Série : D

N° d'ordre : 2

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES

DE L'UNIVERSITÉ DE RENNES

POUR OBTENIR

LE TITRE D'INGÉNIEUR-DOCTEUR

Par Jean POULIGNIER

Ingénieur de l'Institut polytechnique de l'Ouest
Diplômé d'Études supérieures de Sciences physiques.

1re THÈSE. — Contribution a l'étude de l'élasticité du bois.

2e THÈSE. — Propositions données par la Faculté.

Soutenues le **1942, devant la Commission d'examen.**

MM. LE ROLLAND..... *Président.*

DUFFIEUX..... } *Examinateurs.*

TREHIN..... }

PARIS

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-ÉDITEUR

LIBRAIRE DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE

55, Quai des Grands-Augustins, 55

1942

Série : D

N° d'ordre : 2

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES

DE L'UNIVERSITÉ DE RENNES

POUR OBTENIR

LE TITRE D'INGÉNIEUR-DOCTEUR

Par Jean POULIGNIER

Ingénieur de l'Institut polytechnique de l'Ouest
Diplômé d'Études supérieures de Sciences physiques.

1re THÈSE. — Contribution a l'étude de l'élasticité du bois.

2e THÈSE. — Propositions données par la Faculté.

Soutenues le 1942, devant la Commission d'examen.

MM. LE ROLLAND..... *Président.*
DUFFIEUX..... } *Examinateurs.*
TREHIN..... }

PARIS

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-ÉDITEUR

LIBRAIRE DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE

55, Quai des Grands-Augustins, 55

1942

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE RENNES

	MM.
Doyen honoraire.....	BOUZAT.
Doyen.....	MILON.
Professeurs honoraires.....	LE ROUX.
	TISON.

Professeurs :

MM.	ANTOINE.....	T. Mathématiques pures.
	CHEVALET.....	Mathématiques.
	CONDUCHE.....	T. Chimie.
	CHALAUD.....	T. Botanique.
	DUFFIEUX.....	Physique.
Mme	DUBREIL-JACOTIN.....	Mécanique rationnelle.
MM.	GALLIEN.....	Zoologie.
	LENOIR.....	Botanique.
	LE ROLLAND.....	T. Physique.
	MILON.....	T. Géologie et Minéralogie.
	POISSON.....	T. Zoologie.
	SALMON LEGAGNEUR.	Chimie.
	SCHMITT.....	Chimie.
	TREHIN.....	Physique.

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Secrétaire de la Faculté des Sciences..... M. JAVALET.

A LA MÉMOIRE

DE MA MÈRE

A MON MAÎTRE

M. LE ROLLAND

PROFESSEUR A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE RENNES
DIRECTEUR DE L'INSTITUT POLYTECHNIQUE DE L'OUEST

En hommage de respectueuse reconnaissance.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41547311_0033

A Monsieur Georges **DURAND**

ASTRONOME A L'OBSERVATOIRE DE TOULOUSE

En témoignage de mon respectueux attachement.

INTRODUCTION.

Un très grand nombre de facteurs (plus encore que pour les métaux) sont susceptibles de modifier les propriétés mécaniques d'une pièce de bois :

Conditions de croissance de l'arbre (âge, climat, exposition);
Conditions dans lesquelles l'éprouvette est prélevée (près du pied ou dans le haut du tronc, dans le cœur ou dans des régions proches de la périphérie, dans le tronc lui-même ou dans les branches, etc.);
Conditions de séchage (mode, vitesse, durée, etc.);

Il est donc pratiquement impossible de donner, *a priori*, des nombres caractérisant les propriétés élastiques d'une essence déterminée. C'est pourquoi, dans la pratique, on mesure la densité et, partant de la valeur trouvée, on utilise un certain nombre de formules empiriques susceptibles de donner, sans étude plus complète, des indications souvent suffisantes sur les qualités mécaniques du bois utilisé.

Au cours de ce travail, laissant de côté l'examen des divers facteurs énumérés ci-dessus, influant sur la qualité première d'échantillons donnés, nous étudions comment se comportent ces derniers sous l'action des diverses sollicitations élastiques qui sont susceptibles de leur être appliquées. Partant d'éprouvettes choisies de façon à présenter des qualités bien définies, nous comparons les résultats obtenus par différentes méthodes d'essais, afin de préciser les conditions dans lesquelles travaille la matière ligneuse, ainsi que l'influence produite ensuite sur elle, par un certain nombre de facteurs physiques.

Nous nous sommes attaché particulièrement à l'étude des petites déformations, qui, dans l'utilisation pratique, sont introduites par les efforts alternés, si fréquents dans les constructions actuelles. C'est ainsi que nous avons été amené à utiliser, sur le bois, la méthode de mesure des modules d'élasticité à la flexion, mise au point par M. Le Rolland, qui utilise le couplage entre deux systèmes oscillants (1).

Pour obtenir des résultats vraiment concluants, il était nécessaire d'éliminer les causes d'erreurs provenant des variations de résistance et de structure de

(1) *Étude d'une méthode utilisant le couplage entre deux systèmes oscillants pour la détermination de la résistance mécanique des constructions et la mesure des modules d'élasticité* (*Publications scientifiques et techniques du Ministère de l'Air*, n° 47).

différents échantillons et de procéder, par suite, aux divers essais sur les mêmes éprouvettes, ce qui est impossible si on les rompt ou si on leur fait subir des efforts trop importants susceptibles de modifier leur structure.

Nous n'avons cependant pas pu soumettre à la traction et à la compression nos éprouvettes de flexion; car il nous a paru nécessaire d'opérer sur de très longues éprouvettes pour ces deux essais, tandis que la méthode pendulaire donnait de meilleurs résultats pour des formes différentes que nous préciserons plus loin. Mais alors, nous avons toujours prélevé les deux éprouvettes bout à bout dans des planches bien homogènes, ce qui nous a donné des résultats aussi comparables que possible.

Ajoutons, enfin, que la difficulté de préciser les conditions expérimentales nous a obligé, bien qu'opérant sur les mêmes échantillons, à nous assurer que leur état physique était entièrement comparable à lui-même d'une expérience à l'autre. Les éprouvettes, prélevées dans du bois séché à l'air, ont été conservées dans un local où, les conditions physiques ne variant guère, leur degré d'humidité a toujours été voisin de 15 pour 100; exception faite, bien entendu, du cas où le degré d'hygroscopicité était l'objet même de l'étude.

Dans un premier chapitre, après avoir dit quelques mots des méthodes d'essais de flexion statique et des résultats précédemment obtenus par les principaux expérimentateurs, nous parlons de nos propres essais effectués par la même méthode sur éprouvettes encastrées à une extrémité et libres à l'autre. Ce mode de fixation a été choisi afin de permettre une comparaison aussi bonne que possible avec la méthode pendulaire, dans laquelle l'essai le plus pratique et le plus courant est effectué sur des éprouvettes dont une extrémité est fixe, l'autre étant soumise aux efforts alternés créés par les oscillations des pendules. Après avoir montré le rôle de l'encastrement, nous notons le principal inconvénient de la méthode de flexion statique : écoulement de la matière en fonction du temps, qui donne toujours une valeur arbitraire à la mesure de la flèche, créée par l'application d'une charge.

Nous indiquons ensuite, dans un deuxième chapitre, comment nous avons réalisé un élasticimètre pendulaire, spécialement conçu pour notre étude et nous exposons les résultats que nous en avons obtenus. Dans l'étude de l'influence de l'humidité, nous avons l'occasion de définir ce que nous entendons par module réel et module brut. Lorsqu'on humidifie, au cours d'essais, une éprouvette de bois, la surface initiale S_0 d'une section transversale augmente, et devient S'. Si l'on mesure alors la valeur du module d'élasticité, et si l'on désire en obtenir une valeur réelle, il est nécessaire de rapporter les chiffres trouvés à la nouvelle surface S', faute de quoi l'on obtient une valeur apparente du module (ou valeur brute), valeur qui n'est d'ailleurs pas sans intérêt. En effet, lorsque, dans la pratique, une poutrelle de bois s'humidifie, ses dimensions varient en même temps que ses propriétés élastiques et, ce qui intervient dans la rigidité de la construction, c'est bien ce module brut, rapporté à la section initiale S_0 pour laquelle la poutre a été calculée.

Comparant ensuite les résultats trouvés par la méthode de flexion statique et la méthode pendulaire, nous constatons que la première donne des modules un peu plus faibles que l'autre.

Afin de préciser les conditions dans lesquelles travaille le bois et quelles relations peuvent exister entre les différents modules, nous avons exercé sur les mêmes éprouvettes et dans les mêmes conditions, des efforts de traction, compression et torsion. C'est à cette question que nous consacrons le troisième chapitre. Un assez grand nombre d'essais nous montrent que la courbe « allongements-efforts » est pratiquement une droite à la traction, tandis qu'à la compression elle s'incurve à partir d'une certaine contrainte. A la torsion, nous avons appliqué également notre idée générale, en comparant les résultats obtenus, d'une part, au moyen d'essais statiques et, d'autre part, au moyen du pendule de torsion et de la méthode des pendules couplés de M. Le Rolland.

Le but du quatrième chapitre est alors de comparer les différents modules entre eux. Nous trouvons que le module de flexion mesuré par la méthode de flexion pendulaire est égal, au 1/100e près environ, à ceux de traction et de compression obtenus pour de faibles contraintes. L'erreur étant de l'ordre de celle des procédés expérimentaux utilisés, nous pouvons en déduire l'égalité réelle de ces différents modules entre eux, tant que la valeur des efforts ne dépasse pas une certaine limite fixée par la façon dont varie le module de compression. Cette conclusion n'aurait pu être établie avec les chiffres donnés par la méthode statique seule.

Le dernier chapitre est ensuite consacré à quelques applications de la méthode pendulaire. La possibilité de mesurer très simplement par cette méthode l'élasticité, pendant l'intervention même du facteur susceptible de la modifier, permet d'intéressantes applications que nous étudions en détails.

Ainsi, nos essais prouvent que, pour de faibles charges, les calculs pratiques de la Résistance des Matériaux peuvent parfaitement s'appliquer au bois et que la méthode pendulaire est, en particulier, un excellent moyen pour mesurer l'élasticité d'un bois à l'origine des déformations, en éliminant les effets de réactivité.

Enfin, pour terminer, nous mettons en annexe quelques travaux que nous avons effectués sur l'hygroscopicité du bois. Après avoir rappelé les principaux résultats obtenus par les chercheurs qui se sont occupés de cette question, nous montrons comment, sous très faible épaisseur, l'humidité du bois et des matières cellulosiques est liée à celle de l'air. Nous en déduirons alors le principe d'un hygromètre pratique à bois, pouvant être utilisé à la mesure de l'humidité de matières hygroscopiques stockées. Une application pratique de cette méthode a été réalisée à la Manufacture des Tabacs de Nantes.

Notre étude sur le bois a été faite en liaison avec le Service technique et des Recherches scientifiques de l'Aéronautique, qui nous a fourni les moyens indispensables à son exécution.

Qu'il me soit permis de remercier ici M. Moutte, Ingénieur en chef de l'Aéronautique, Chef du Service des Matières premières, et M. Collardet, Professeur à l'École Nationale supérieure de l'Aéronautique, Chef du Laboratoire des bois du Ministère de l'Air, qui m'ont constamment et très utilement aidé, et m'ont toujours donné les plus précieux encouragements.

A l'Institut Polytechnique de l'Ouest, j'ai effectué ce travail sous la direction de M. Le Rolland, Professeur à la Faculté des Sciences de Rennes et Directeur de l'Institut. A mon Maître, je tiens à exprimer mes sentiments de profonde gratitude, pour ses précieux conseils et l'aide toujours bienveillante qu'il n'a cessé de me prodiguer. De tout cela, je ne saurais trop le remercier.

J'ai étudié et réalisé dans les Laboratoires de l'I. P. O. tous les dispositifs pratiques décrits dans cette étude. Je tiens à exprimer ma reconnaissance à tous ceux qui m'y ont facilité la tâche.

CHAPITRE PREMIER.

ESSAIS D'ÉLASTICITÉ DU BOIS PAR LA MÉTHODE CLASSIQUE DE FLEXION STATIQUE.

A. — TRAVAUX ANTÉRIEURS.

Au point de vue de la construction, le problème de la flexion des poutres de bois est de toute première importance. Aussi, a-t-il donné lieu à de très nombreux travaux; mais la question est particulièrement complexe et, pour cette raison, elle a provoqué de nombreuses discussions.

Des travaux des principaux expérimentateurs, il est cependant facile d'extraire un certain nombre de résultats importants. D'une manière générale, l'essai de flexion est effectué sur des poutres reposant à leurs extrémités sur deux appuis simples. On fait agir une charge P à égale distance des deux appuis et l'on mesure la flèche, ce qui permet de calculer le module d'élasticité E, par la formule classique de la résistance des matériaux

$$f = \frac{P l^3}{48 E I},$$

dans laquelle I est le moment d'inertie de la poutre par rapport à un axe horizontal passant par la fibre neutre et l sa longueur entre appuis.

Cette méthode, qui élimine les inconvénients d'un encastrement, exige cependant que l'on précise les conditions de travail des couteaux servant de points d'appui.

En ce qui concerne les formes et les dimensions des éprouvettes utilisées dans de tels essais, celles-ci sont toujours de section transversale rectangulaire ou carrée. Les expérimentateurs ont alors défini des dimensions servant dans les mesures pratiques destinées à qualifier les bois utilisés dans l'industrie. Tandis que les Américains opèrent, en général, sur des échantillons à section carrée de $5^{cm},08$ de côté (2 pouces) et de $71^{cm},12$ (28 pouces) de longueur entre appuis, les Austro-Allemands fixent les dimensions à $1^{m},50$ de portée entre les supports pour des éprouvettes mesurant transversalement 10×10^{cm}. Si l'on considère le rapport entre la longueur utile l et la cote transversale h de la poutre, les diverses valeurs précédentes donnent un rapport $\frac{l}{h}$ supérieur

à 12, chiffre indiqué par M. Monnin (1), comme étant un minimum, en deçà duquel l'essai de flexion n'aurait plus de valeur.

Divers auteurs ont, en effet, étudié l'influence des dimensions de l'éprouvette sur la résistance. En France, M. Monnin (2) a obtenu une série de résultats montrant l'influence du rapport entre la portée et les dimensions transversales de l'éprouvette et prouvé que la résistance unitaire du bois à la flexion, en ce qui concerne la limite élastique comme à la limite de rupture, baisse quand le rapport $\frac{l}{h}$ diminue.

Baumann (3), en Allemagne, arrive à la même conclusion, mais précise que lorsque ce rapport est supérieur à 20, la résistance unitaire reste sensiblement constante. Elle varie surtout pour $\frac{l}{h}$ compris entre 0 et 10.

En ce qui concerne le calcul des éprouvettes de section rectangulaire soumises à la flexion, dans les conditions précédentes, Tanaka (4) et Monnin proposent de remplacer la formule classique de Navier

$$F = \frac{3}{2}\frac{Pl}{bh^2}$$

par l'expression corrigée

$$F = \frac{3}{2}\frac{Pl}{bh^n},$$

dans laquelle F représente la charge unitaire admissible pour un élément de poutre fléchie, reposant sur deux appuis simples et soumis à une charge P concentrée en son milieu, cette poutre ayant une hauteur h et une dimension transversale b. Le coefficient n, toujours différent de 2, a pour but de faire intervenir la qualité de l'échantillon de bois utilisé.

M. Monnin (5) donne pour l'exposant n, les valeurs suivantes, basées sur des résultats expérimentaux :

Bois de premier choix (sans défauts).....	$\frac{10}{6} < n < \frac{11}{6}$
Bois de deuxième choix (construction et menuiserie).....	$\frac{9}{6} < n < \frac{10}{6}$
Bois de troisième choix (très noueux).....	$\frac{8}{6} < n < \frac{9}{6}$

Pour calculer le coefficient d'élasticité des bois dans des conditions comparables d'exactitude, malgré les défauts de la matière ligneuse utilisée, M. Monnin est amené à adopter la formule

$$E = \frac{pLF}{6f},$$

(1) *Essais physiques, statiques et dynamiques des bois* (*Bulletin de la Section technique de l'Aéronautique militaire*, fasc. 30, p. 26).

(2) *Ibid.*, p. 22 à 24.

(3) R. Baumann, *Die bisherigen Ergebnisse der Holzprüfungen in der Materialprüfungsanstalt an der Teschnischen Hochschule Stuttgart Forsch* (*Arb. Ing. Wes.*, 1922, Cahier 231). — Baumann-Lang, *Das Holz als Baustoff*, 2, Auflage, München, 1927.

(4) Communication faite au Congrès des I.V.M., à Bruxelles, 1906.

(5) Monnin, *loc. cit.*, p. 25.

dans laquelle p représente la portée et F' la résistance unitaire calculée, comme on vient de le voir, avec $n = \frac{11}{6}$, et correspondant à une charge quelconque P' donnant une flèche f'.

D'autres expérimentateurs, enfin, donnent la répartition des tensions dans une poutre fléchie. Bach (1) montre, par exemple, après avoir mesuré sur une poutre fléchie les allongements ou raccourcissements de fibres situées de part et d'autre de l'axe, et à diverses distances, que la fibre neutre s'éloigne d'autant plus de cet axe géométrique que la charge appliquée est plus forte. En effet, plus cette dernière augmente et plus il y a de différence entre les modules de traction et de compression, l'expérience ayant montré que le module d'élasticité à la compression diminue quand la charge augmente. Se basant sur des essais directs, Bach a d'ailleurs tracé des courbes de déformations en fonction de la charge, mettant en évidence ce dernier phénomène. On conçoit alors facilement que, dans la poutre fortement fléchie, la fibre neutre se déplace vers la partie tendue, pour rétablir l'équilibre entre les forces élastiques de traction et de compression.

Enfin, certains auteurs pensent que l'on peut appliquer dans certaines conditions la formule habituelle de flexion : c'est ainsi que M. Campredon, dans un récent article (2), écrit ce qui suit : « A notre avis, pour les efforts d'ordre pratique, les charges restant en dessous des limites de sécurité, la formule classique de flexion reste applicable, malgré ses imperfections. Il ne nous semble pas utile de la remplacer par une formule nouvelle (faisant intervenir le déplacement de la fibre neutre). Cependant, pour tenir compte de la décroissance, constatée dans les essais, de la fatigue unitaire en fonction de la hauteur de la poutre fléchie, nous pouvons jouer sur la valeur des limites de sécurité. »

Nos essais vont d'ailleurs prouver que, pour de faibles charges, cette idée de M. Campredon est parfaitement justifiée.

B. — EXPOSÉ DE NOS ESSAIS.

Nous nous sommes proposé, au cours de cette étude, d'étudier la flexion du bois, non seulement par la méthode statique, mais aussi en appliquant la méthode pendulaire de M. Le Rolland. Or, cette dernière méthode est surtout d'une application commode avec des pendules de gravité exerçant un effort alternatif à l'extrémité libre d'une éprouvette encastrée à l'autre. Pour nous placer dans des conditions aussi peu différentes que possible d'une méthode à l'autre, nous avons fait nos essais de flexion statique sur éprouvettes également encastrées à une seule extrémité.

---

(1) C. Bach, *Elastizität und Festigkeit*, 9, Auflage, Seite 395 f, Berlin, 1924.

(2) J. Campredon, *Le bois et la résistance des matériaux. Éléments de calcul. Construction des ouvrages* (Revue *Travaux*, n° 60, décembre 1937, édition Sciences et Industries).

a. **Nature des éprouvettes.**

La réalisation expérimentale d'un bon encastrement, sur le contour d'une section carrée, présente de grandes difficultés. Si l'on serre l'éprouvette sur deux faces seulement, la matière ligneuse se déformant facilement, les deux autres faces se gonflent et il y a une déformation importante modifiant profondément la structure de l'échantillon, surtout à l'encastrement. Or, c'est là que précisément la courbure de l'éprouvette est maxima et que la déformation de flexion est également maxima. Pour obtenir de bons résultats, il serait nécessaire de comprimer également les quatre faces; mais, on se trouve alors en présence d'un problème complexe, et il faudrait un dispositif mécanique assez compliqué pour le résoudre d'une façon satisfaisante.

D'autre part, dans l'élasticimètre pendulaire, que nous étudierons plus loin et sur lequel nous désirions utiliser les mêmes éprouvettes, celles-ci doivent occuper une position bien définie sur l'axe de symétrie du système oscillant. Il était donc nécessaire de fixer l'éprouvette au plateau supérieur au moyen d'un dispositif à serrage uniforme et concentrique. Ceci est particulièrement facile à réaliser sur éprouvette cylindrique.

Nous avons donc effectué toutes nos mesures de flexion sur des échantillons de section transversale circulaire, et non rectangulaire ou carrée, comme on avait coutume de le faire jusqu'ici. Après des essais effectués avec divers modes de serrage, nous nous sommes arrêté à un système qui a donné des résultats bien constants. Il consiste à serrer l'éprouvette au moyen d'un manchon élastique commandé par un cône à l'intérieur d'un mandrin.

Les dimensions de l'éprouvette ont été choisies de façon que le rapport de la longueur au diamètre soit suffisamment grand, afin que les formules de la résistance des matériaux soient applicables. D'autre part, ce rapport devait être fixé de façon que l'on obtienne une valeur moyenne convenable comme durée des battements dans les essais aux pendules. Enfin, nous ne voulions pas prendre un diamètre trop faible, afin d'obtenir une valeur aussi exacte que possible pour l'élasticité moyenne de l'échantillon. En effet, le bois étant constitué par la juxtaposition de couches annuelles de propriétés différentes, il est indispensable que la proportion de bois de printemps et de bois d'été, très difficile à évaluer, n'intervienne pas de façon sensible. On risquerait, en effet, sans cela, d'avoir des résultats trop particuliers et peu faciles à interpréter. Cependant, il ne fallait pas non plus utiliser des éprouvettes trop volumineuses, car il est difficile d'obtenir avec ces dernières des échantillons sans défauts, à l'intérieur desquels les fibres peuvent être considérées comme sensiblement droites et parallèles.

Ces différentes considérations nous ont conduit à adopter les dimensions moyennes suivantes :

Longueur..... 275^{mm} · Diamètre..... 18^{mm}

Les propriétés mécaniques d'une éprouvette de bois étant fonction de l'orientation de son axe par rapport à la direction des fibres, nous avons natu-

rellement taillé nos éprouvettes de façon que cet angle des fibres et de l'axe soit nul, sauf dans quelques essais spéciaux, où l'influence de l'orientation des fibres constituait précisément l'objet de notre étude.

En prélevant une éprouvette de section circulaire, d'axe parallèle aux fibres du bois, nous ne faisons pas intervenir une orientation particulière de la section par rapport aux couches annuelles et nous nous plaçons ainsi dans les conditions les plus simples. Toutefois, comme les propriétés élastiques d'un

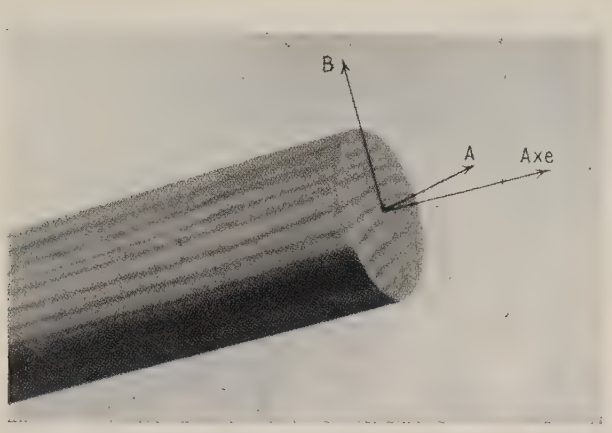


Fig. 1. — Orientation des deux principales directions d'efforts exercés dans l'essai de flexion.

bois sont fonction de l'orientation des sollicitations dans la section droite, nous serons amenés à faire deux séries d'essais :

1° Le plan de sollicitation coïncidant avec celui des couches annuelles (sens A, *fig.* 1).

2° Le plan de sollicitation étant radial, c'est-à-dire normal à celui des couches annuelles (sens B, *fig.* 1).

b. **Principe de la méthode.**

L'éprouvette est encastrée horizontalement dans un mandrin spécial à serrage par cône, assurant l'immobilisation, aussi uniforme que possible, sur tout le pourtour, de l'échantillon. Un poids, placé à l'autre extrémité, à 240^{mm} de l'encastrement, produit la flexion de l'éprouvette (*fig.* 2).

On détermine l'angle φ dont dévie l'extrémité de la fibre neutre. La théorie classique de la Résistance des Matériaux indique que cet angle est fourni par la formule

$$\varphi = \frac{P l^2}{2EI},$$

formule qui permet de calculer la valeur du module d'élasticité E.

La mesure de l'angle φ est faite par la méthode de Poggendorf, à l'aide d'un petit miroir concave collé à l'extrémité de l'éprouvette, et donnant l'image du filament d'une lampe à incandescence L sur une règle translucide R placée à $0^m,95$ (*fig.* 2).

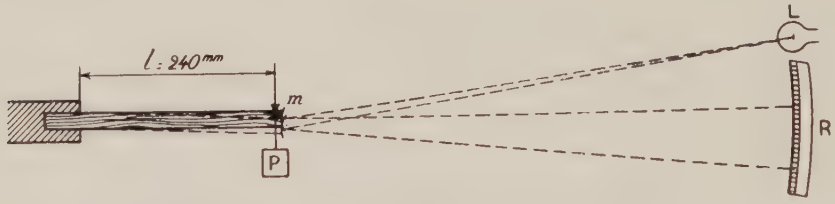


Fig. 2. — Schéma du dispositif de flexion statique.

Mais la lecture de la déviation sur la règle ne donne pas directement la valeur de l'angle φ. Considérons, en effet, la figure 3. Si nous appliquons une certaine charge à l'extrémité libre, celle-ci se déplace d'une valeur a et le spot, qui, au début de l'expérience, était en A, viendrait en B s'il n'y avait pas rotation. Celle-ci se produit en même temps, et si l'angle de la nouvelle direction

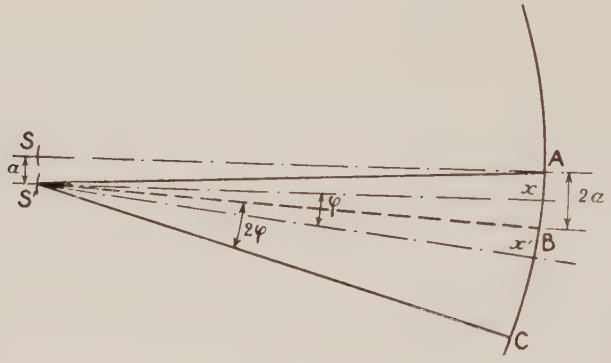


Fig. 3.

de l'axe avec l'ancienne est φ, l'angle entre la direction SB et la direction réelle du rayon est 2φ. Ainsi, si nous appelons d la lecture faite sur la règle, D la distance du miroir à la règle, la valeur de l'angle φ est donnée par la relation

$$\varphi = \frac{d - 2a}{2D}.$$

Au cours de nos expériences, a était déterminé au moyen d'une lunette à micromètre. Négliger l'influence du facteur a conduirait à une erreur pouvant atteindre le 20^e.

L'expérience ayant montré que les phénomènes de réactivité intervenaient d'une façon très appréciable, il fallait définir exactement les conditions de l'essai : le poids a donc été appliqué à l'éprouvette pendant 30 secondes, puis enlevé durant le même temps, placé à nouveau, etc.

Les deux premières applications ont accusé une flèche résiduelle appréciable, mais on pouvait généralement admettre qu'après cinq ou six opérations alternées analogues, l'accommodation était réalisée de façon satisfaisante.

Ainsi, nous avons mis en évidence ce fait essentiel : dans un essai statique, il y a toujours écoulement, plus ou moins rapide suivant la valeur de la charge. Afin d'éliminer autant que possible l'influence de cet écoulement, nous faisions les lectures aussitôt après la dernière application de l'effort. Il n'en reste pas moins qu'il y a là une cause d'erreur difficile à évaluer, *a priori*, et impossible à éliminer complètement.

c. Influence de la durée d'application de la charge sur la valeur de la déformation d'une éprouvette travaillant en flexion statique simple.

Nous avons voulu savoir si cet écoulement dont nous venons de parler a une limite. Si celle-ci existait, en effet, il suffirait de prolonger suffisamment la durée de l'essai, pour obtenir une déformation permettant de déterminer sans erreur la valeur absolue de la rigidité d'un bois par flexion statique.

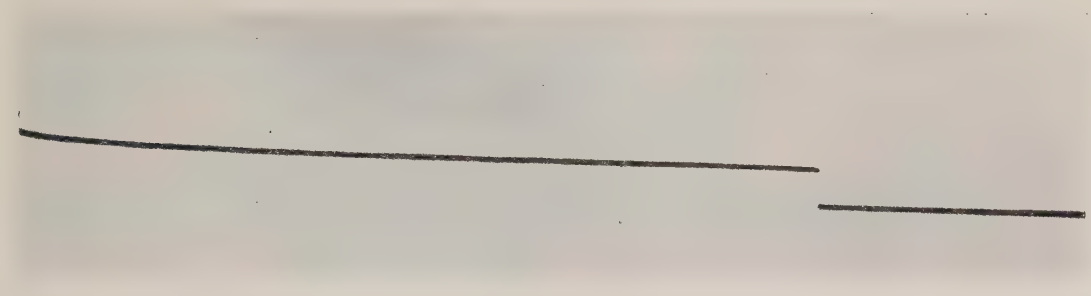


Fig. 4.

A cet effet, nous avons entrepris une série d'essais portant sur des éprouvettes d'essences variées, soumises à un effort constant pendant un temps relativement long. Par enregistrement direct, nous avons mesuré directement la valeur de la déformation en fonction de la durée d'application de la charge.

Pour cela, utilisant tout d'abord le dispositif de flexion statique précédemment décrit (mais avec un encastrement relativement court), nous nous sommes contenté de laisser un poids de 4^{kg} suspendu à l'extrémité de l'éprouvette et d'enregistrer la déformation par la méthode de Poggendorf. La règle graduée était alors simplement remplacée par un cylindre enregistreur faisant un tour en 24 heures. Un mouvement d'horlogerie assurait l'entraînement de ce cylindre, sur lequel était enroulé du papier photographique.

Nous avons alors obtenu des courbes (comme celle de la figure 4) présentant une ou plusieurs discontinuités. Celles-ci pouvaient provenir : soit de causes accidentelles; soit de ruptures locales restant invisibles, dans la masse de l'éprouvette; soit, enfin, de l'encastrement. En fixant un miroir sur celui-ci,

il fut facile de s'assurer que ces phénomènes n'étaient dus, ni à un fléchissement accidentel du support de l'éprouvette, ni à un déplacement du cylindre enregistreur.

La rupture locale de fibres étant une hypothèse peu vraisemblable, il était plus intéressant de vérifier d'abord l'influence éventuelle de l'encastrement, ce qui pouvait se faire très simplement.

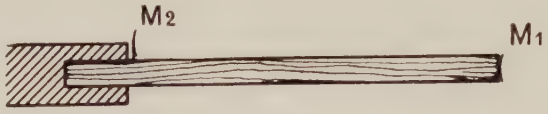


Fig. 5.

Pour cela, nous avons fixé sur l'éprouvette (*fig.* 5), un second miroir juste au bord de l'encastrement. Nous avons de cette façon obtenu simultanément les deux courbes de la figure 6. Celle du haut est due au miroir M_2 et celle du bas au miroir M_1. Nous voyons ainsi que, dans les conditions défectueuses où nous nous étions placé (encastrement peu étendu), la majeure partie du fléchissement était due à cet encastrement. L'éprouvette se trouvait déformée par écrasement dans les mors, et ce phénomène arrivait à masquer presque totalement celui de la flexion. D'autre part, de fortes déformations permanentes se produisant,

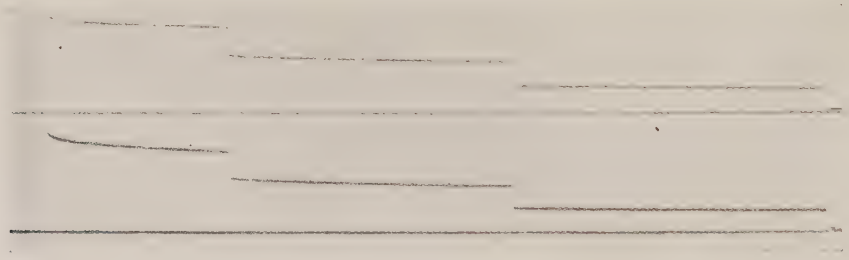


Fig. 6. — Flexion sous charge constante (Sapin du Nord).

(La courbe du dessus est celle du témoin d'encastrement.
On voit très bien ici comment se produisent l'écoulement et le décrochage.)

le bois s'accommodait et, ne réagissant plus élastiquement, arrivait au bout d'un certain temps à ne plus assurer une adhérence suffisante dans l'encastrement. A ce moment, il y avait glissement; de nouvelles conditions d'équilibre étaient créées et le phénomène recommençait à nouveau suivant le même processus. Il y a là une manifestation intéressante de la réactivité.

Est-ce à dire que tous nos résultats, obtenus sur éprouvettes encastrées, vont se trouver faussés par les circonstances que nous venons de préciser ? Évidemment non, car, d'une part, dans cette méthode, nous avons opéré durant un temps très court ne permettant pas à l'écrasement de se produire et, d'autre part, en allongeant l'encastrement, nous pouvions espérer faire disparaître le phénomène. C'est ce que l'expérience nous a permis de vérifier, comme nous le verrons plus loin.

Dans la méthode pendulaire, opérant à charge moyenne nulle, l'inconvénient que l'on vient de constater ne paraît pas devoir troubler la mesure d'une façon sensible. En effet, non seulement l'effort maximum est très faible, mais il ne se maintient de même sens que pendant un temps très court (à peine

Fig. 7.

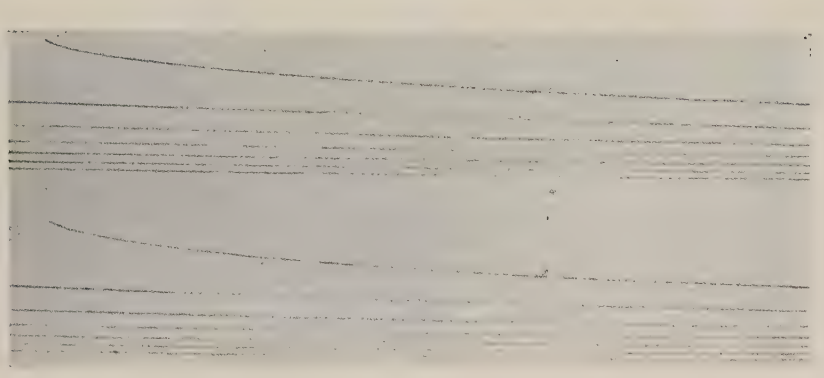


Fig. 8. — Courbes représentant les phénomènes d'écoulement se produisant par flexion.

La courbe du haut est obtenue avec une éprouvette à tête carrée; celle du bas avec une éprouvette ordinaire, serrée dans un encastrement allongé. Il est impossible de constater une différence entre les deux courbes. Essence : chêne de forêt.

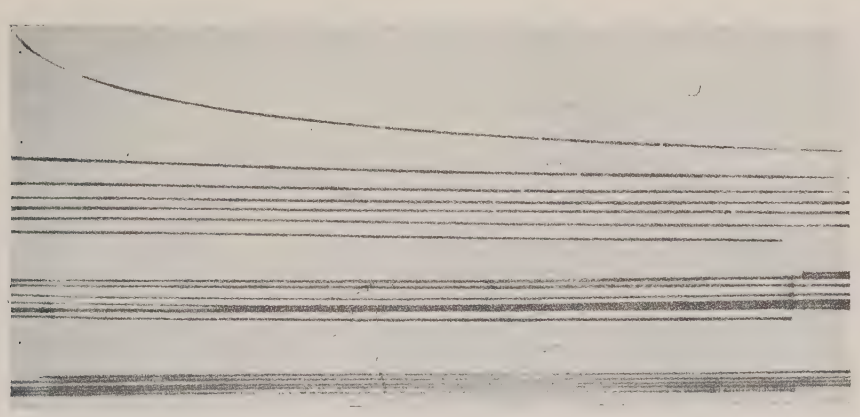


Fig. 9. — Écoulement d'une éprouvette de hêtre soumise à une charge de 4 kg durant 21 jours.

(Les irrégularités de la courbe proviennent des imperfections d'entraînement du cylindre enregistreur, dues aux dents d'engrenage.)

plus d'un quart de seconde, à chaque oscillation). Aucun écrasement appréciable, susceptible de fausser les résultats, n'est donc susceptible de se produire.

Pour nous assurer qu'il est possible d'éliminer l'effet de l'encastrement, nous avons refait les mêmes expériences dans les conditions suivantes : 1° en allongeant l'encastrement; 2° en utilisant des éprouvettes, taillées comme le

représente la figure 7 et ayant une base carrée de fortes dimensions, assurant un encastrement, pour ainsi dire, parfait. Nous n'avons trouvé aucune différence sensible entre les résultats obtenus avec ces deux modes d'encastrement. Il est facile de s'en rendre compte en comparant les courbes de la figure 8, représentant l'écoulement de deux éprouvettes d'un même bois, soumises à la même charge, l'une présentant une « tête » et l'autre simplement encastrée.

d. **Quelques résultats obtenus dans les conditions normales.**

Dans le tableau suivant, nous donnons pour différents échantillons de bois, les valeurs trouvées pour le module de flexion dans les sens A et B, précédemment définis, par application de la formule

$$E = \frac{P l^2}{2 \gamma I}.$$

Les conditions d'essai étaient les suivantes :

l = distance à l'encastrement du point d'application de la charge;
P = charge : $0^{kg},500$.

Durée d'application = 30 secondes, après cinq charges et décharges successives.

Suivant la coutume adoptée pour le bois, nous exprimons les modules en kilogrammes par centimètre carré.

ESSENCES.	MODULES en kg cm².	
	SENS D'ESSAI A (tangentiel).	SENS D'ESSAI B (radial).
Pitchpin	141 100	144 000
Acacia	137 000	137 000
Sapin du Nord	123 000	127 500
Frêne (cœur)	120 100	128 200
Frêne (aubier)	120 100	128 100
Charme	117 800	113 200
Hêtre	114 800	112 800
Pin maritime	109 000	103 800
Chêne de forêt	108 000	106 300
Cormier	107 500	106 500
Sapin de Russie	104 500	100 800
Spruce	102 700	101 000
Noyer	93 700	97 100
Peuplier	92 100	87 600
Sapin du Jura	90 600	89 400
Orme	87 100	90 700
Châtaignier	87 100	83 800
Okoumé	84 500	82 600
Acajou	77 200	75 800
Platane	77 800	72 600
Teck	61 800	57 300

c. **Étude de la rigidité en fonction de l'angle α d'inclinaison de la fibre sur l'axe.**

Nous avons prélevé plusieurs séries d'éprouvettes, telles que la direction moyenne des fibres fasse différents angles α, avec l'axe (*fig.* 10).

Nous donnons, dans ce qui suit, les résultats de deux études nettement concluantes, obtenues, l'une avec du hêtre, l'autre avec du chêne.

Dans la première, nous avons effectué nos essais sur cinq éprouvettes, dans lesquelles les différentes valeurs de α sont respectivement de 3°, 8°, 20°, 60° et 80°.

Dans la seconde, neuf éprouvettes ont été utilisées. Les angles respectifs sont de 0°, 2°, 6°, 12°, 20°, 36°, 45°, 70° et 90°. Naturellement, ces valeurs ne sont pas rigoureuses et représentent plutôt des moyennes, car l'inclinaison varie légèrement le long de l'éprouvette; mais il n'y a que d'assez faibles différences.

Il est, d'autre part, intéressant de noter qu'il est facile d'obtenir ces éprouvettes sur un tour à métaux, à condition d'affûter un outil spécial et de ne pas tourner trop vite. Dans ces conditions, il est inutile d'utiliser une lunette pour le tournage.

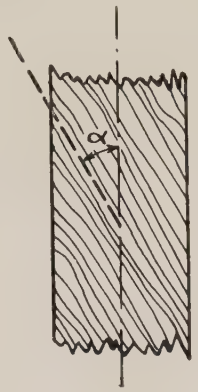


Fig. 10. — Inclinaison de la fibre sur l'axe.

Les essais ont été faits avec des charges régulièrement croissantes, de façon à permettre l'étude complète de la variation du module en fonction de la déformation et de l'effort.

Pour les éprouvettes les plus rigides, la charge a été portée jusqu'à 5 kg. En raison de la fragilité et de la grande flexibilité des autres, nous ne les avons pas chargées autant, mais nous avons fait plusieurs essais spéciaux sous faible charge, afin d'obtenir, malgré tout, un nombre suffisant de résultats.

Les courbes des figures 11 à 14 donnent pour chacune des deux essences considérées :

1° Les déplacements du spot, correspondant aux différents angles φ d'inclinaison de la fibre neutre par rapport à la direction initiale (à charge nulle), en fonction de l'inclinaison α des fibres sur l'axe de l'éprouvette. Chaque courbe est donnée pour une charge constante, dont la valeur est indiquée sur elle.

2° Les déplacements du spot correspondant aux différents angles φ, en fonction des charges appliquées. Chaque courbe est donnée pour une éprouvette, dont l'angle d'inclinaison des fibres par rapport à l'axe, est indiqué sur le tracé.

Nous donnons ci-après les valeurs que l'on peut calculer pour les modules, à partir des résultats expérimentaux obtenus.

L'examen des tableaux et des courbes précédents conduit à formuler les remarques suivantes :

1° D'une façon générale, la rigidité dans le sens A (tangentiel) n'est jamais bien différente de celle trouvée dans le sens B (radial). Ces résultats seront

I. — Tableau des modules des éprouvettes de hêtre.

INCLINAISON DES FIBRES et sens d'essai.		MODULES en kg/cm² POUR LES DIFFÉRENTES CHARGES					
		500.	1 000.	2 000.	3 000.	4 000.	5 000.
3°	Sens A ...	106 000	106 000	104 000	100 500	94 500	94 000
	Sens B....	106 000	102 000	98 000	103 000	98 000	96 500
8°	Sens A ...	98 000	91 000	94 500	87 000	85 000	81 700
	Sens B....	85 000	91 000	91 000	90 000	88 000	85 000
20°	Sens A ...	51 000	51 000	50 000	48 500	46 700	
	Sens B.. .	53 100	51 000	50 500	49 000	47 200	
60°	Sens A ...	16 700	16 100	15 300			
	Sens B....	15 500	15 500	15 000			
75°	Sens A ...	13 700	13 300				
	Sens B....	12 700	12 350				

II. — Tableau des modules des éprouvettes de chêne.

INCLINAISON DES FIBRES et sens d'essai.		MODULES en kg cm² POUR LES DIFFÉRENTES CHARGES					
		500.	1 000.	2 000.	3 000.	4 000.	5 000.
0°	Sens A ...	109 000	109 000	109 000	104 000	104 000	114 000
	Sens B....	103 000	103 700	109 000	107 000	109 000	109 000
2°	Sens A ...	121 000	121 000	121 000	121 000	118 000	113 500
	Sens B....	116 000	114 800	115 000	121 000	121 000	112 000
6°	Sens A ...	113 500	113 600	115 000	113 000	112 000	110 000
	Sens B....	109 000	114 800	112 000	113 000	113 000	113 500
12°	Sens A ...	84 000	87 900	85 500	84 000	83 800	81 400
	Sens B....	84 000	83 800	83 900	85 000	86 400	84 000
20°	Sens A ...	60 500	60 500	59 000	59 500	57 400	55 600
	Sens B....	60 500	60 500	60 700	60 000	59 000	57 000
30°	Sens A ...	47 500	41 200	34 900	35 200	34 600	–
	Sens B....	37 500	36 400	35 200	35 900	35 100	–
45°	Sens A ...	18 200	17 900	16 500			
	Sens B....	17 600	17 800	17 000			
70°	Sens A ...	15 000	14 800	14 300			–
	Sens B....	14 800	14 800	14 600			–
90°	Sens A ...	14 000	13 400	13 300			–
	Sens B....	13 600	13 400	13 500			–

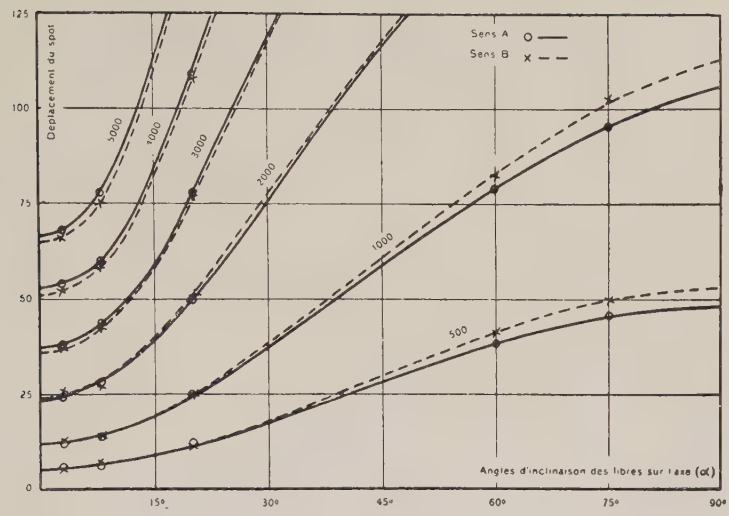


Fig. 11. — Déplacement du spot, proportionnel à φ, pour différentes éprouvettes de hêtre, dont l'axe et le sens des fibres font entre eux différents angles α.

(Chaque courbe correspond à une charge constante, indiquée en grammes sur les courbes.)

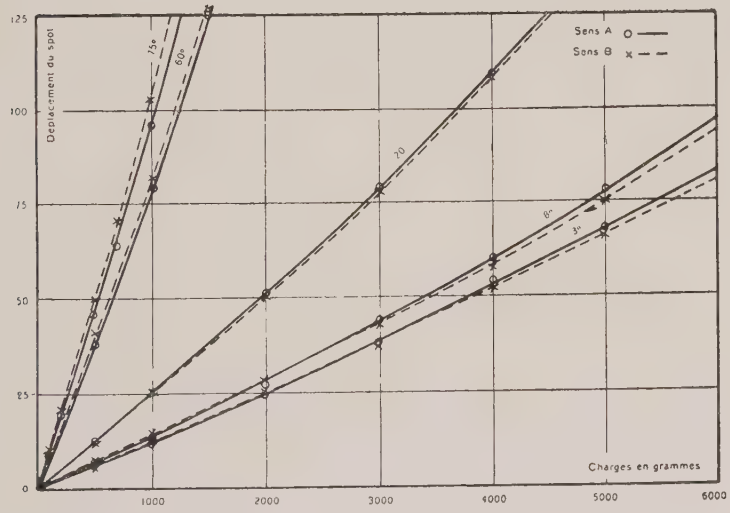


Fig. 12. — Déplacement du spot, proportionnel à l'angle φ, pour différentes éprouvettes de hêtre, dont l'axe et le sens des fibres font entre eux différents angles α.

(Chaque courbe correspond à une éprouvette dont l'angle α est indiqué sur la courbe.)

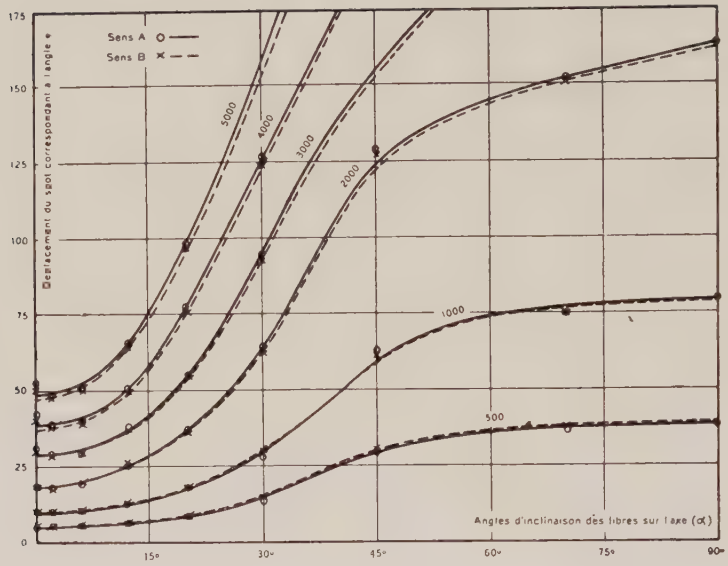


Fig. 13. — Déplacement du spot, proportionnel à l'angle φ, pour différentes éprouvettes de chêne de forêt, dont l'axe et le sens des fibres font entre eux différents angles α.

(Chaque courbe correspond à une charge constante exprimée en grammes.)

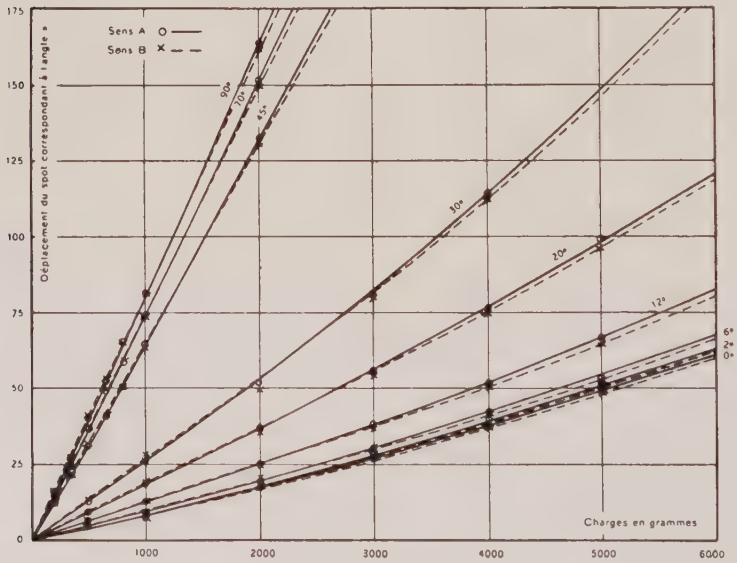


Fig. 14. — Déplacement du spot, proportionnel à l'angle φ, pour différentes éprouvettes de chêne de forêt, dont l'axe et le sens des fibres font entre eux différents angles α.

(Chaque courbe correspond à une éprouvette dont l'angle α est indiqué sur la courbe.)

d'ailleurs confirmés, par la suite, dans l'essai pendulaire. De plus, bien qu'en général le module soit plus grand dans le sens où la flexion se fait dans un plan tangent aux couches annuelles (A), il y a des cas, pour certains bois, où le contraire se produit.

2° L'orientation des fibres par rapport à l'axe de l'éprouvette a une influence considérable, puisque le module peut varier du simple au décuple lorsque l'on passe d'une orientation transversale à une orientation longitudinale. Considérant, par exemple, les courbes des figures 11 et 13, on voit que toutes présentent un point d'inflexion situé aux environs de 40°. Près de l'origine, c'est-à-dire pour de faibles angles α, l'inclinaison n'intervient que peu. De même, lorsque l'angle atteint 60°. Ces faits paraissent d'ailleurs naturels, car, dans le premier cas, il y a toujours des fibres de grande longueur, dont une faible proportion seulement est tranchée et, dans le deuxième cas, les fibres étant nettement transversales, donc très courtes, ne jouent plus un grand rôle dans la résistance. L'allure nettement sinusoïdale des courbes fait, d'autre part, penser que l'élasticité longitudinale de l'éprouvette est fonction directe de celle des fibres et du cosinus de l'angle α. Ceci explique qu'au voisinage de 0 et de 90°, le module varie peu en fonction de l'angle.

Il est, enfin, intéressant de constater que nos courbes sont analogues à celles obtenues par Baumann (1), dans ses études sur la même question, faites au moyen d'éprouvettes prismatiques reposant sur deux appuis simples. Bien que les méthodes employées soient nettement différentes, les résultats sont absolument analogues.

C'est donc bien la fibre, comme on peut d'ailleurs le penser *a priori*, qui joue le rôle principal dans la résistance élastique. Si elle est sectionnée, la rigidité diminue de façon considérable, la matière qui assure la liaison des fibres n'ayant qu'une faible résistance.

3° Si l'on examine attentivement les deux systèmes de courbes, on constate que celles (*fig.* 12 et 14) représentant les déplacements correspondant aux sens A et B se coupent en deux points, d'ailleurs variables. Ainsi, pour une éprouvette donnée, le rapport, entre les deux rigidités, paraît s'inverser lorsque la charge augmente. De même, pour des charges de même valeur, appliquées sur des éprouvettes de même essence, mais d'inclinaison (α) des fibres variable, ce rapport paraît également s'inverser dans certains cas. Nous nous contenterons de signaler ce fait, car la variation du module avec l'orientation de l'effort par rapport aux couches annuelles est trop peu sensible pour que l'on puisse énoncer une loi générale. Dans la pratique d'ailleurs, les couches annuelles sont loin d'être planes et l'élasticité de la pièce de bois est une moyenne; un tel phénomène, s'il existe, n'a donc que fort peu d'importance.

4° On voit, enfin, que les modules dépendent de la charge. Plus celle-ci est grande et plus le module trouvé est faible. Ceci est en rapport avec le fait

---

(1) *Loc. cit.*, p. 6.

que le module de compression décroît quand la contrainte augmente, ainsi que l'indiquent les travaux de nombreux auteurs. Cela nous laisse prévoir, d'autre part, que la méthode statique doit donner pour les modules des valeurs plus faibles que celles obtenues par d'autres méthodes opérant à charge moyenne nulle. Ce résultat sera confirmé d'une manière systématique dans nos essais aux pendules, et nous reviendrons sur cette question lorsque nous comparerons les deux méthodes.

CHAPITRE II.

ESSAIS D'ÉLASTICITÉ EN APPLICATION DE LA MÉTHODE DES PENDULES COUPLÉS DE M. LE ROLLAND.

A. — PRINCIPE GÉNÉRAL DE LA MÉTHODE [1].

La substance dont on veut déterminer le module d'élasticité est utilisée sous forme d'une éprouvette prismatique droite, de section circulaire ou rectangulaire. Le principe général de la méthode consiste à relier à cette éprouvette, encastrée ou appuyée de façon bien déterminée, deux systèmes oscillants identiques (pendules de gravité ou pendules élastiques) et à observer les battements qui se produisent entre ces deux systèmes par un échange mutuel et périodique de leur énergie, par l'intermédiaire de l'éprouvette. Celle-ci intervient par son élasticité propre dans des conditions où le module est parfaitement défini : déformations très petites, alternées et, par conséquent, accommodation de la matière, définition très précise des forces mises en jeu.

Nous allons préciser ce principe sur un des modes particuliers de réalisation de la méthode : celui que nous avons adopté dans nos essais (*fig.* 15).

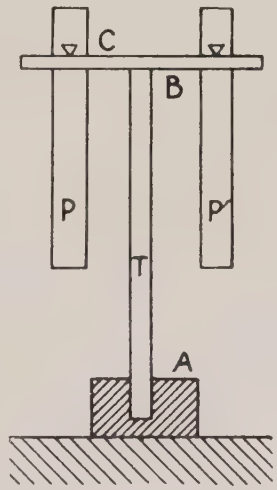


Fig. 15. — Dispositif adopté pour la mesure du module d'élasticité au moyen de deux pendules de gravité.

Considérons une tige T de la matière dont on veut mesurer le module, encastrée bien verticalement par sa partie inférieure A, et portant à son extrémité supérieure B, une plate-forme horizontale C, rigide. Sur cette plate-forme, faisons reposer par leurs couteaux deux pendules identiques P et P′. Nous réalisons ainsi un système entièrement symétrique à deux degrés de liberté, dont les mouvements vont dépendre essentiellement des conditions initiales imposées aux pendules.

L'un des pendules P étant bien au repos, lançons le pendule P′ sous une amplitude quelconque. La réaction longitudinale du pendule P′ sur son support

[1] *C. R. Acad. sc.*, t. 192, 9 février 1931, p. 336; et *Publ. Sc. du Ministère de l'Air*, n° 47.

produit de petites déformations élastiques de la tige T, et celles-ci mettent en mouvement le pendule P. Dès lors, l'amplitude de P′ diminue, tandis que celle de P augmente, l'énergie passant de l'un à l'autre.

A un certain moment, le pendule lancé s'arrête complètement, et les rôles des deux pendules sont intervertis. C'est alors P qui cède son énergie à P′ et revient peu à peu au repos, alors que P′ reprend sensiblement son amplitude de départ.

Nous observons donc un échange entièrement symétrique de l'énergie entre les deux pendules, avec des arrêts périodiques de chacun d'eux.

C'est le phénomène classique des battements entre pendules sympathiques, observé par Savart et que M. Le Rolland a eu l'idée d'utiliser pour la détermination de la rigidité et, par suite, de l'élasticité spécifique des matériaux.

L'élément d'observation est le temps τ qui s'écoule entre deux arrêts successifs d'un même pendule (durée des battements).

Bien entendu, on peut déduire τ de l'observation de plusieurs battements des pendules, ce qui permet d'augmenter à volonté la précision de la mesure.

B. — DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL.

Nous avons vu, au chapitre précédent, quelles éprouvettes nous avons été amené à utiliser dans les essais statiques. Nous avons donné les raisons de notre choix, lorsque nous avons précisé les raisons qui ont orienté nos expériences sur éprouvettes encastrées. Ce sont ces mêmes éprouvettes que nous employons dans notre élasticimètre pendulaire spécialement conçu et construit pour l'étude du bois (*fig.* 16).

L'échantillon E est vertical, et solidement encastré dans le socle en fonte S. Les pendules P et P′, pouvant osciller autour des arêtes de leurs couteaux, reposent sur de petits plans de verre, fixés aux extrémités d'une plate-forme rigide A, de façon que les axes d'oscillation soient exactement dans le plan horizontal passant par le bord de l'encastrement de l'éprouvette dans le mandrin d'acier B.

Le lancement du pendule P est réalisé à l'aide d'un doigt mobile D qui écarte le pendule de sa position d'équilibre et peut être ramené brusquement en arrière par l'action d'un ressort. En vue d'obtenir le maximum de précision dans l'essai, un dispositif spécial a été établi pour obtenir l'arrêt rapide et complet des pendules avant le début de l'expérience : des secteurs en aluminium, fixés à la partie supérieure de chaque pendule, se déplacent à faible distance des pôles d'un électro-aimant; les courants de Foucault, qui naissent dans les secteurs, suffisent pour freiner les pendules. Grâce à cet ensemble, toute erreur initiale due au lancement est éliminée : le pendule récepteur est parfaitement au repos quand le pendule moteur, brusquement abandonné à lui-même, se trouve lancé.

Un manchon cylindrique M peut être fixé de façon à entourer complètement l'éprouvette. Étanche et calorifugé, ce manchon permet de maintenir

l'éprouvette dans des conditions bien définies d'humidité ou de température. L'étanchéité, nécessaire à réaliser, est obtenue au moyen d'un joint hydraulique. Nous avons, d'ailleurs, vérifié que les faibles frottements introduits par ce joint, non seulement n'avaient aucune influence qualitative sur le phénomène des battements, mais ne modifiaient pas la période d'une manière sensible.

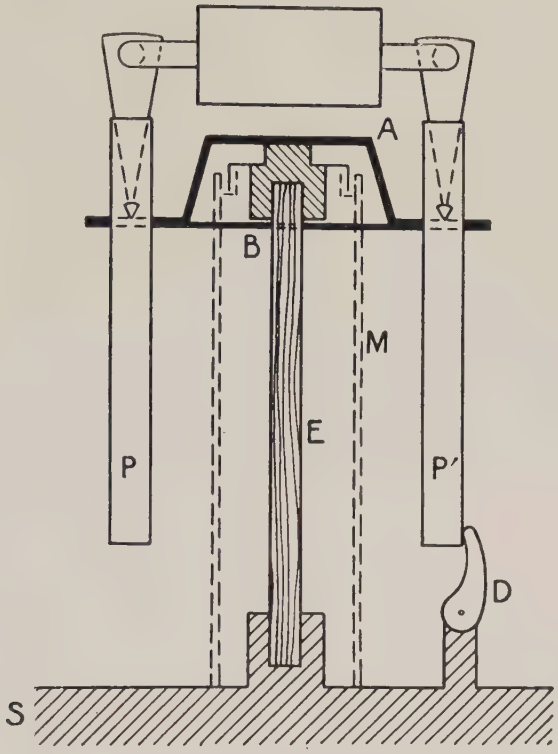


Fig. 16. — Schéma de l'élasticimètre pendulaire destiné à l'étude des bois.

Les deux photographies ci-jointes (*fig.* 17 et 18) montrent l'ensemble du dispositif. Sur l'une, l'éprouvette n'est pas visible, car elle est entourée du manchon (on aperçoit parfaitement, à la partie supérieure, le joint hydraulique réalisant l'étanchéité entre la partie fixe et l'équipage mobile). Sur l'autre, on distingue l'encastrement inférieur, réalisé par un manchon à serrage par cône. L'électro-aimant est maintenu par la colonne que l'on aperçoit en arrière de l'éprouvette.

C. — THÉORIE DE LA MÉTHODE.

a. Calculs généraux.

Dans ce qui précède, nous venons d'exposer le principe de la méthode et de dire comment, au point de vue pratique, nous réalisons un appareil permettant la mesure pratique de la durée des battements τ. Reproduisons maintenant

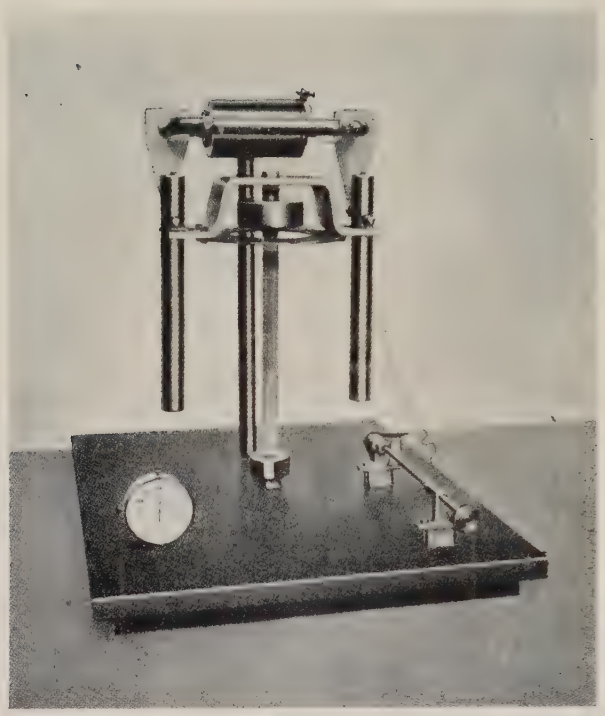


Fig. 17.

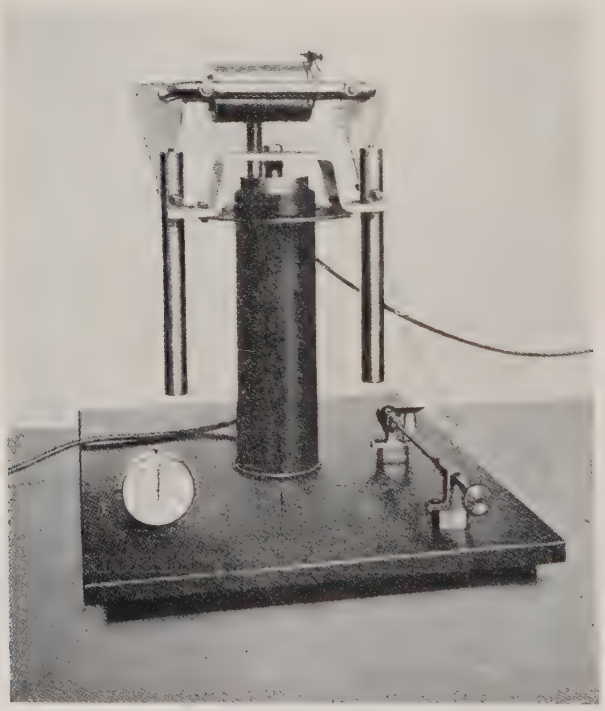


Fig. 18.

l'essentiel de la théorie, donnée par M. Le Rolland (1), grâce à laquelle on peut passer de l'élément d'observation τ, durée des battements, à l'expression de la rigidité de la substance étudiée.

Considérons donc une tige AB (*fig.* 19), encastrée à sa partie inférieure et disposée verticalement. A l'extrémité supérieure est fixé un plateau horizontal CD, suffisamment rigide pour que sa flexion propre soit négligeable. Ce plateau sert de support commun aux deux pendules de gravité P_1 et P_2, qui oscillent dans le même plan.

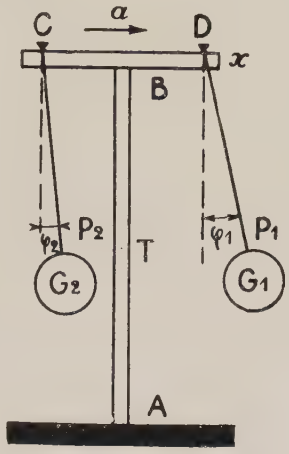


Fig. 19.

Nous supposons le plateau CD assez court, pour que l'on puisse admettre, sans erreur sensible, que le mouvement des points de suspension des pendules est horizontal.

Enfin, nous admettrons que les amplitudes des pendules sont toujours petites (2), ce qui est toujours le cas dans la pratique.

Soit M_1 la masse du pendule P_1 qui sera, par exemple, celui que nous lancerons (pendule moteur), I_1 son moment d'inertie par rapport à l'axe de rotation, h_1 la distance de son centre de gravité (G_1) à cet axe; enfin, φ_1 l'angle qui déterminera la position de ce pendule par rapport à la verticale de son point de suspension. Soient, d'autre part, M_2, I_2, h_2, φ_2 les grandeurs correspondantes pour le deuxième pendule (que nous ne supposerons pas, pour l'instant, identique au premier).

Les équations du mouvement des pendules s'écrivent immédiatement. Si a est le déplacement à l'instant t du point C (ce déplacement est égal à celui de D), nous avons

$$(1)\qquad \begin{cases} I_1 \dfrac{d^2\varphi_1}{dt^2} = -M_1 g h_1 \varphi_1 - M_1 h_1 \dfrac{d^2 a}{dt^2}, \\ I_2 \dfrac{d^2\varphi_2}{dt^2} = -M_2 g h_2 \varphi_2 - M_2 h_2 \dfrac{d^2 a}{dt^2}. \end{cases}$$

Pour déterminer l'accélération $\dfrac{d^2 a}{dt^2}$ du support, il faut connaître les forces que les pendules exercent en C et D et les déplacements provoqués par ces forces. On doit donc calculer les réactions des composantes X_1 et Y_1, X_2 et Y_2 exercées par les pendules sur leur support.

---

(1) P. Le Rolland et P. Sorin, *Publications scientifiques et techniques du Ministère de l'Air* (n° 47). Étude d'une méthode utilisant le couplage entre deux systèmes oscillants pour la détermination de la résistance mécanique des constructions et la mesure des modules d'élasticité (p. 31).

(2) *Ibid.* L'étude complète, expérimentale et théorique de M. Le Rolland nous renseigne sur la façon dont interviennent ces hypothèses restrictives.

Elles sont

$$(2)\qquad \begin{cases} X_1 = -M_1\left(\dfrac{d^2a}{dt^2} + h_1\dfrac{d^2\varphi_1}{dt^2}\right), \\ Y_1 = -M_1 g, \\ X_2 = -M_2\left(\dfrac{d^2a}{dt^2} + h_2\dfrac{d^2\varphi_2}{dt^2}\right), \\ Y_2 = -M_2 g. \end{cases}$$

On voit qu'au degré d'approximation que nous avons fixé, il n'y a pas lieu de tenir compte de l'effet des réactions verticales des pendules. Elles sont constantes, mais il faut cependant remarquer que si les pendules n'étaient pas de même masse, ces actions verticales produiraient une flexion statique initiale de la tige, qui pourrait intervenir dans le résultat de la mesure, si le module d'élasticité était fonction de la déformation.

Les actions horizontales exercées par les pendules sur le support sont, à chaque instant, équilibrées par la réaction élastique de la tige, puisque nous avons admis que l'on pourrait négliger les forces d'inertie du support ainsi que celles de la tige. Nous pouvons donc écrire

$$(3)\qquad X_1 + X_2 = Ka.$$

K mesurera le *coefficient de rigidité de la tige* dans les conditions expérimentales que nous venons de définir.

Mais nous opérons toujours sur pendules identiques, comme nous l'avons dit dans les paragraphes précédents. On y gagne, en effet, en simplicité, et l'on a l'avantage de diminuer ainsi le plus possible l'erreur qui pourrait s'introduire par suite d'un déréglage des pendules, et d'obtenir, de plus, le maximum de précision dans la mesure, en rendant la durée des battements sensiblement proportionnelle à la rigidité.

Soient alors M, h et I les caractéristiques mécaniques communes aux deux pendules.

Considérons d'abord les pendules simples. Alors

$$I = Mh^2,$$

et les expressions (1) deviennent

$$(4)\qquad \begin{cases} h\dfrac{d^2\varphi_1}{dt^2} = -g\varphi_1 - \dfrac{d^2a}{dt^2}, \\ h\dfrac{d^2\varphi_2}{dt^2} = -g\varphi_2 - \dfrac{d^2a}{dt^2}. \end{cases}$$

D'où, en tenant compte de (2),

$$X_1 = Mg\varphi_1,$$

et de même

$$X_2 = Mg\varphi_2.$$

Résolvons nos équations, c'est-à-dire cherchons les valeurs de φ_1 et de φ_2 en fonction du temps.

Posons

$$u = \varphi_1 + \varphi_2,$$

$$v = \varphi_1 - \varphi_2.$$

Il vient, en soustrayant les deux relations (4),

$$h\frac{d^2v}{dt^2} + gv = 0,$$

équation différentielle, qui montre que v est une fonction harmonique du temps

$$v = v_0 \cos(\omega t + \varepsilon) \qquad \text{avec} \quad \omega = \sqrt{\frac{g}{h}}.$$

De même, en additionnant, nous obtenons

$$h\frac{d^2u}{dt^2} + gu + 2\frac{d^2a}{dt^2} = 0.$$

Or

$$Ka = X_1 + X_2 = Mg\varphi_1 + Mg\varphi_2 = Mgu,$$

donc

$$\left(2\frac{Mg}{K} + h\right)\frac{d^2u}{dt^2} + gu = 0.$$

u est donc aussi une fonction harmonique du temps

$$u = u_0 \cos(\omega' t + \varepsilon'),$$

avec

$$\omega' = \sqrt{\frac{g}{h + \frac{2Mg}{K}}}.$$

Revenant à φ_1 et φ_2, nous obtenons

$$\varphi_1 = \frac{1}{2}\left[u_0 \cos(\omega' t + \varepsilon') + v_0 \cos(\omega t + \varepsilon)\right],$$

$$\varphi_2 = \frac{1}{2}\left[u_0 \cos(\omega' t + \varepsilon') - v_0 \cos(\omega t + \varepsilon)\right].$$

Pour déterminer les constantes, il suffit de remarquer, qu'au temps $t = 0$

$$\varphi_1 = 0 \qquad \text{et} \qquad \varphi_2 = 0.$$

Par conséquent

$$u_0 = v_0 = 0 \qquad \text{et} \qquad \varepsilon = \varepsilon' = 0.$$

Finalement

$$(5)\qquad \begin{cases} \varphi_1 = \frac{1}{2}\theta[\cos\omega' t + \cos\omega t], \\ \varphi_2 = \frac{1}{2}\theta[\cos\omega' t - \cos\omega t] \end{cases}$$

ou encore

$$\varphi_1 = \theta\cos\frac{(\omega-\omega')t}{2}\cos\frac{(\omega+\omega')t}{2}$$

et

$$\varphi_2 = \theta\sin\frac{(\omega-\omega')t}{2}\sin\frac{(\omega+\omega')t}{2}.$$

Chaque pendule oscille avec une amplitude qui varie en fonction sinusoïdale du temps. On observera donc des battements dans leur mouvement. La durée de ces battements, c'est-à-dire le temps qui séparera deux arrêts successifs de chaque pendule, sera évidemment la valeur (τ) de t, au bout de laquelle l'argument $\frac{(\omega-\omega')t}{2}$ t aura varié de π. On a donc

$$(6)\qquad \tau = \frac{2\pi}{\omega - \omega'}.$$

Exprimons maintenant $\omega - \omega'$ en fonction des données caractéristiques des pendules. On peut écrire, pour des valeurs de K suffisamment grandes,

$$\omega' = \sqrt{\frac{g}{h + 2\frac{Mg}{K}}} = \sqrt{\frac{g}{h}}\left(1 - \frac{Mg}{Kh}\right) = \omega\left(1 - \frac{Mg}{Kh}\right),$$

d'où

$$\omega' - \omega = \frac{Mg\omega}{Kh}$$

et, par suite, en introduisant la valeur de τ donnée par (6),

$$K = \frac{Mg\omega}{2\pi h}\tau.$$

Or, T étant la période du pendule, on a

$$\frac{g}{h} = \frac{4\pi^2}{T^2} \qquad \text{et} \qquad \omega = \frac{2\pi}{T},$$

d'où, en définitive,

$$(7)\qquad K = \frac{4\pi^2 M\tau}{T^2}.$$

Comment cette relation entre K et τ est-elle modifiée dans le cas des pendules réels, pour lesquels le rayon de giration n'est jamais nul ? La théorie exacte devient plus difficile, mais on peut répondre à la question de façon très

simple, en première approximation. En effet, en supposant que la tige soit assez rigide pour que les forces d'inertie dues au mouvement des pendules ne soient pas sensiblement affectées par le mouvement toujours très petit de la tige (ce qui est toujours réalisé dans la pratique), on peut prendre comme expression des réactions X_1 et X_2

$$X_1 = - Mh \frac{d^2\varphi_1}{dt^2},$$

$$X_2 = - Mh \frac{d^2\varphi_2}{dt^2},$$

et, comme on a, avec la même approximation,

$$\frac{d^2\varphi_1}{dt^2} = - \frac{Mgh}{I} \varphi_1$$

et

$$\frac{d^2\varphi_2}{dt^2} = - \frac{Mgh}{I} \varphi_2,$$

on obtient finalement comme « équation de liaison » entre les pendules

$$X_1 + X_2 = Ka = \frac{Mh^2}{I} Mg(\varphi_1 + \varphi_2).$$

Avec les pendules simples, nous avions obtenu

$$Ka = Mg(\varphi_1 + \varphi_2),$$

et l'on voit que, les équations restant de la même forme, que les pendules soient simples ou composés, la relation (7) est remplacée par la suivante

$$\frac{I}{Mh^2} K = \frac{4\pi^2 M}{T^2} \tau$$

ou

$$K = \frac{Mh^2}{I} \frac{4\pi^2 M}{T^2} \tau. \qquad (8)$$

Nous avons, dans toutes nos expériences, utilisé des pendules cylindriques réalisés de telle façon que la durée d'oscillation soit un minimum par rapport à la position du couteau. Par l'emploi de tels pendules, on rend minimum l'erreur de déréglage due à une variation accidentelle dans la position de ce couteau. Cette considération tire son importance de la présence de T^3 au dénominateur, dans l'expression de K (la période de T ayant ainsi une influence considérable dans le calcul de la rigidité).

Pour de tels pendules cylindriques, on démontre aisément que $\frac{Mh^2}{I} = \frac{1}{2}$ et l'on cherche à réaliser cette condition avec le plus d'exactitude possible.

Dans son travail, M. Le Rolland, se plaçant dans le cas général, a donné l'expression complète de la rigidité en fonction de la durée τ des battements.

Par une étude à la fois théorique et expérimentale, il a montré que la correction la plus importante à apporter à la formule (8) est celle due à la masse du support et de la tige.

Avec les pendules spéciaux dont nous venons de parler et en tenant compte des forces d'inertie du support et de la tige, la formule à employer est

$$K = \frac{2\pi^2 M}{T^2}\left(\frac{\tau}{T} + \frac{2\mu}{M}\right),$$

dans laquelle μ est égal à la masse du support, augmentée des 33/140 de celle de l'éprouvette.

Enfin, d'après la théorie de la Résistance des Matériaux, le module d'élasticité E s'exprime en fonction de la rigidité K de la tige, définie par le rapport de la charge à la flèche de flexion statique à l'extrémité de l'éprouvette fléchie de longueur l, au moyen de la formule

$$E = \frac{K l^3}{3J},$$

puisque

$$K = \frac{3EJ}{l^3},$$

J étant le moment d'inertie polaire de la section transversale.

On en déduit immédiatement E en fonction de τ.

b. **Application à nos essais.**

Montrons que, dans le cas spécial de nos expériences, E se trouve donné en fonction de τ par la formule très simple

$$E = 388(\tau + 1,4) \text{ kg/cm}^2.$$

En effet, commençons par négliger l'influence toujours faible du terme en μ, c'est-à-dire l'influence des forces d'inertie du support et de l'éprouvette :

Nous avons, avec nos pendules cylindriques,

$$K = \frac{2\pi^2 M}{T^2}\tau,$$

d'où

$$E = \frac{2\pi^2 l^3 M}{3JT^2},$$

et comme, pour une tige cylindrique dont la section est un cercle de diamètre d,

$$J = \frac{\pi d^4}{64},$$

il vient

$$E = \frac{128\pi M l^3}{T^2 d^4}\tau.$$

Dans toutes nos expériences, nous avons

$$T = 0,767 \text{ s.} \qquad d = 1,8 \text{ cm.} \qquad l = 24,6 \text{ cm,}$$
$$M = 950,5 \text{ g.}$$

D'où

$$E = 3,805.10^8 \tau \qquad \text{(C. G. S.)}$$

ou

$$E = 388\tau \text{ kg/cm}^2$$

Il reste à tenir compte de l'influence des forces d'inertie du support et de l'éprouvette. Cette influence est toujours faible dans nos expériences.

Tout d'abord, la masse de l'éprouvette étant au maximum de 55g, on peut négliger les forces d'inertie de l'éprouvette elle-même à l'approximation du $\frac{1}{10000}$, puisque le terme correctif en μ, dû à cette éprouvette, n'est que 0,0267, alors que $\frac{\tau}{T} = 261$ dans le cas le plus défavorable ($\tau = 200$ s).

Cherchons maintenant la correction due aux forces d'inertie du support. Ce dernier a toujours une masse de 850g.

Posons

$$K = \frac{2\pi^2 M}{T^3}(\tau + \varepsilon),$$

nous avons

$$\varepsilon = \frac{2\mu}{M} T,$$

et l'on trouve

$$\varepsilon = \frac{2 \times 850}{950} \times 0,767 = 1,373 \text{ s.}$$

Ce qui revient à dire que, pour tenir compte des forces d'inertie du support, il faut ajouter un temps constant d'environ 1,4 s à la durée observée pour les battements.

On a donc bien

$$K = 388(\tau + 1,4) \text{ kg/cm}^2. \qquad (9)$$

Nous avons d'ailleurs vérifié la validité de cette formule générale (et, par suite, celle de la correction d'inertie du support) en plaçant sur le plateau portant les pendules des surcharges variables. Plus le support est lourd, moins longue est la durée des battements avec une même éprouvette. La formule (9) se vérifie parfaitement.

D. — RÉSULTATS DES MESURES DE MODULES PAR LA MÉTHODE PENDULAIRE DANS LES CONDITIONS NORMALES.

Nous avons rassemblé ces résultats dans le tableau suivant qui donne, en kilogrammes par centimètre carré, pour chaque essence de bois soumis à l'essai, la valeur du module d'élasticité de flexion :

1° Dans le sens parallèle (ou tangent) aux couches annuelles (sens A).
2° Dans le sens normal à ces mêmes couches (sens B).

(Chacun de ces résultats représente une moyenne de valeurs obtenues, avec un certain nombre d'éprouvettes prélevées dans chaque pièce de bois des diverses essences ayant servi à nos essais.)

ESSENCES.	MODULES en kg cm².	
	Sens A.	Sens B.
Acacia	164 800	160 100
Chêne de forêt	160 100	155 000
Pitchpin	141 100	144 000
Frêne (aubier)	134 200	128 100
Spruce	130 000	132 000
Hêtre	130 200	128 200
Sapin du Nord	127 200	128 300
Pin maritime	121 000	126 100
Sapin de Russie	120 300	116 900
Charme	117 800	113 200
Frêne (cœur)	115 200	113 000
Cormier	107 500	106 500
Sapin du Jura	98 500	97 400
Noyer	95 800	96 700
Orme	93 100	100 500
Okoumé	92 800	88 100
Acajou	86 500	85 800
Châtaignier	85 000	82 300
Peuplier	85 000	82 200
Platane	81 800	80 700
Teck	77 700	77 300

Nous avons admis, pour définir les modules ainsi trouvés, que la formule classique de la flexion plane s'applique à un matériau aussi hétérogène que le bois. De ces seuls essais, nous ne pouvons donc que conclure : « L'échantillon de bois soumis à l'essai se comporte dans la flexion plane, comme un corps parfaitement élastique, homogène et isotrope du module E. »

Il faut des expériences particulières, d'ailleurs assez délicates, pour pouvoir répondre à la véritable question relative à la flexion : y a-t-il identité

entre les modules du bois à la traction et à la compression et quelle est, par suite, la position réelle de la fibre neutre dans la flexion ? Nous traiterons cette question dans le Chapitre III, et nous verrons alors que la formule classique est parfaitement applicable dans le cas de l'essai aux pendules.

Quoi qu'il en soit, avant d'aller plus loin dans cette importante question, nous avons tenu à rechercher, d'une part, quelle était l'influence de l'humidité et, d'autre part, à comparer les résultats de la méthode pendulaire avec ceux de la méthode statique précédemment étudiée.

E. — VARIATIONS DU MODULE EN FONCTION DU DEGRÉ HYGROSCOPIQUE.

Jusqu'ici, nous avons toujours considéré et étudié les éprouvettes de bois dans les conditions normales, c'est-à-dire à une teneur de 14 ou 15 pour 100 d'eau. Voyons maintenant comment varient les propriétés élastiques quand cette teneur en eau est modifiée. Pour cela, nous ferons subir aux éprouvettes différents traitements hygrométriques. Avant de les étudier, nous indiquerons utilement comment nous avons mesuré les différentes teneurs en eau.

a. Mesure du degré d'humidité.

Les mesures de ce genre étant assez délicates, précisons le mode opératoire utilisé.

Le pourcentage en eau (h) de l'échantillon est obtenu de la façon suivante :

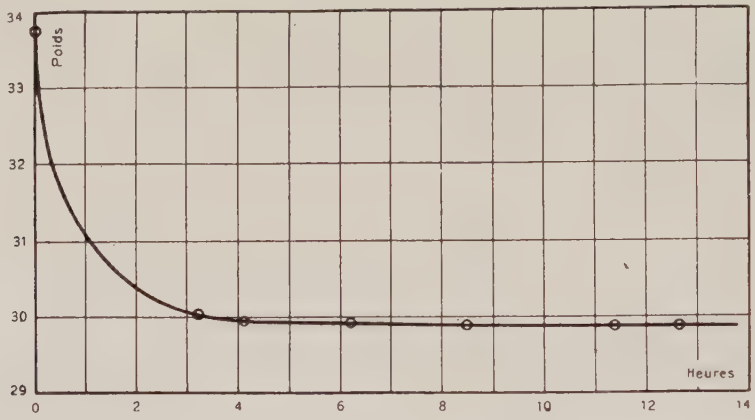
Soient : p' le poids de l'éprouvette à étudier ne renfermant pas d'eau;
p le poids de l'éprouvette contenant une certaine quantité d'humidité.

Nous posons (comme les auteurs qui ont étudié précédemment cette question)

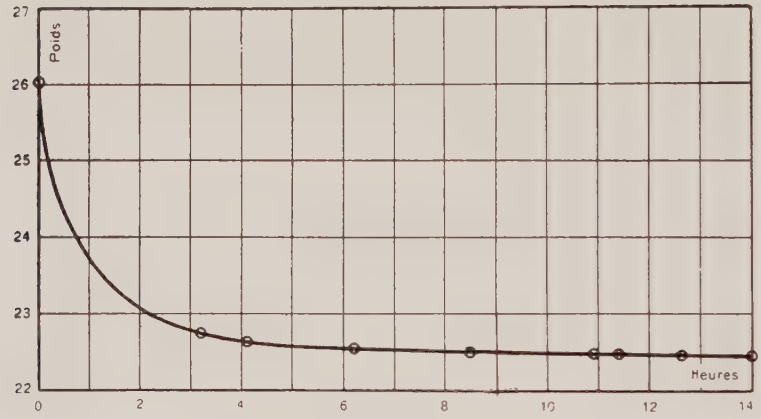
$$h = \frac{p' - p}{p'} \times 100.$$

Mais la difficulté est d'éliminer complètement l'eau contenue dans la matière ligneuse. Pour cela, nous chauffons l'éprouvette dans une étuve dans laquelle circule un courant d'air, aux environs de 110°-120°, pendant un nombre d'heures suffisant. En général, on doit compter sur 2 h de dessiccation pour 10 cm^3 de bois : nos éprouvettes faisant 70 cm^3 environ, il leur aurait fallu environ 14 h de dessiccation. En réalité, étant données leurs faibles dimensions transversales par rapport à leur longueur, 10 à 11 h suffisent et, après 6 h de chauffage, on peut déterminer le degré initial d'humidité à moins de 2 pour 100 près.

Les diagrammes de la figure 20 représentent les variations du poids de l'éprouvette en fonction du nombre d'heures de chauffage dans l'étuve. Ils donnent une idée très nette de la vitesse à laquelle se produit la dessiccation.



Nature du bois : Sapin du Nord.



Nature du bois : Okoumé.

Fig. 20. — Courbes donnant les variations de poids en fonction du nombre d'heures de séchage.

b. **Conditions d'essais.**

Utilisant toujours les mêmes éprouvettes, prélevées dans du bois sec à l'air, nous les plongions, pour modifier leur teneur en eau, dans un bain de vapeur à 100°. Elles se chargeaient d'humidité, d'une façon importante, mais variable avec les essences et le temps d'exposition. Un seul traitement de ce genre ne répartissant pas également l'eau dans la masse fibreuse, nous laissions alors l'éprouvette, pendant plusieurs jours, séjourner en vase clos, pour réaliser un équilibre complet. On ne l'en sortait que pour faire un essai aux pendules et la peser rapidement.

c. **Résultats.**

Dans les six tableaux suivants, nous donnons, pour différentes essences soumises à l'essai, les modules correspondant à différents degrés hygroscopiques. Dans une première colonne figure le poids de l'éprouvette, dans une deuxième le taux d'humidité, calculé comme il est dit plus haut, et dans les deux dernières, enfin, les valeurs des modules pour les sens A et B.

Frêne (*aubier*).

POIDS.	HUMIDITÉ.	MODULES	
		SENS A.	SENS B.
g	%		
43,52	0	123 800	120 800
50,44	15,78	120 800	116 600
51,72	18,81	124 200	117 700
52,65	20,95	125 300	114 800
53,50	22,95	125 300	115 200
53,80	23,56	120 200	115 200

Frêne (*cœur*).

POIDS.	HUMIDITÉ.	MODULES.	
		SENS A.	SENS B.
g	%		
40,95	0,00	97 500	96 800
48,71	18,95	105 200	103 800
49,49	20,85	104 900	102 800
49,68	21,31	105 200	100 300
50,40	23,07	103 800	99 600
50,77	23,97	103 200	98 900

Teck.

POIDS.	HUMIDITÉ.	MODULES.	
		SENS A.	SENS B.
g	%		
33,36	0,00	71 400	74 800
38,27	14,72	70 600	70 200
38,80	16,32	71 300	73 400
39,13	17,30	68 200	68 200
39,48	18,50	69 800	72 100
39,76	19,18	69 600	71 400

Spruce.

POIDS.	HUMIDITÉ.	MODULES.	
		SENS A.	SENS B.
g 28,36	% 0,00	98 900	97 800
33,15	16,90	105 200	104 100
34,09	20,22	105 900	102 800
34,85	22,89	101 300	103 400
35,42	24,92	102 400	102 000
35,90	26,58	97 500	96 200

Okoumé.

POIDS.	HUMIDITÉ.	MODULES.	
		SENS A.	SENS B.
g 34,12	% 17,24	85 800	82 300
34,78	19,55	84 400	79 800
35,31	21,33	84 400	80 200
36,58	25,64	84 800	80 500

Sapin du Jura.

POIDS.	HUMIDITÉ.	MODULES.	
		SENS A.	SENS B.
g 26,12	% 15,88	79 500	80 500
26,71	18,49	79 800	78 800
34,94	55,05	76 000	74 900
35,90	55,95	77 400	77 400

Tous ces résultats sont représentés graphiquement par les courbes des figures 21 à 26. Il semble donc qu'en général le module dans le sens A varie assez peu; dans le sens B, il diminue au contraire assez rapidement, ce qui s'explique bien, si l'on assimile les couches annuelles dures (bois d'été) à une juxtaposition de feuillets pouvant glisser les uns sur les autres; ce glissement étant d'autant plus facile que la matière poreuse intermédiaire (bois de printemps) contient plus d'eau.

Les variations sont différentes avec chaque essence et même avec chaque éprouvette (1).

(1) Les deux échantillons de frêne étaient taillés dans la même planche.

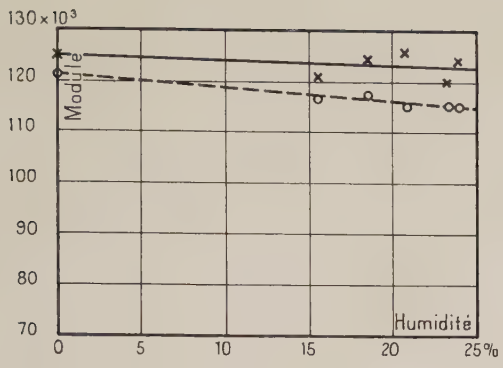


Fig. 21. — Frêne (aubier).

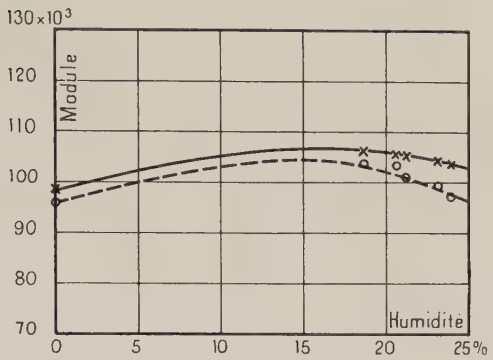


Fig. 22. — Frêne (cœur).

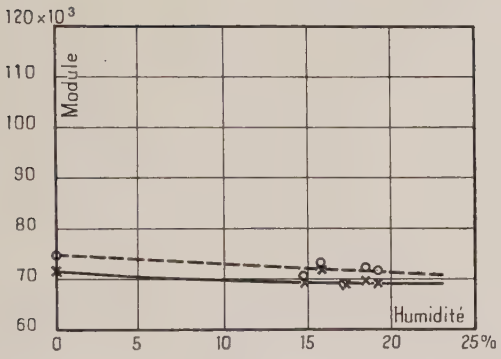


Fig. 23. — Teck.

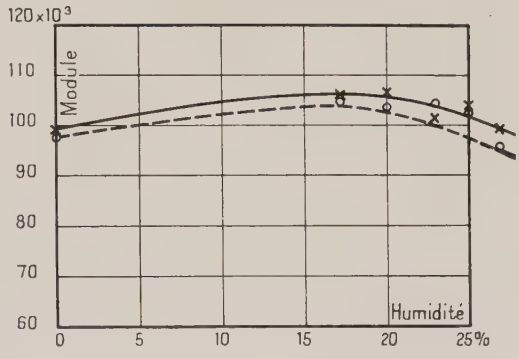


Fig. 24. — Spruce.

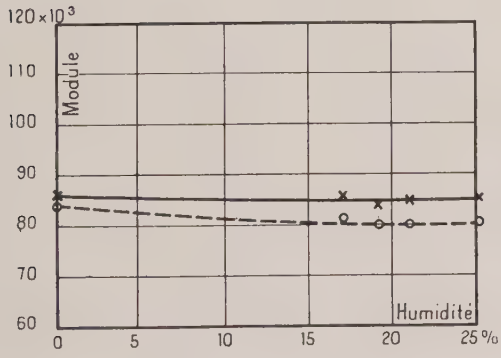


Fig. 25. — Okoumé.

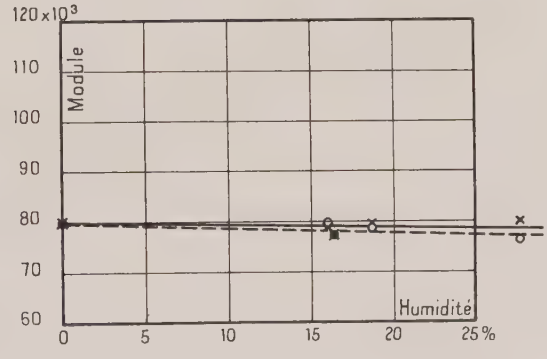


Fig. 26. — Sapin du Jura.

Sens A ————————

Sens B – – – – – – – –

Il semblerait, enfin, que certains bois (spruce et frêne) ont un maximum de rigidité pour un degré d'humidité voisin de 15 pour 100.

Ces résultats diffèrent notablement de ceux qui ont été obtenus par les expérimentateurs allemands, suisses et américains. Nous avons alors décidé de refaire nos essais, en modifiant le procédé d'humidification. Au lieu de plonger l'éprouvette dans la vapeur, nous l'avons simplement laissée séjourner dans l'eau pendant un certain nombre d'heures; après quoi, elle était maintenue en atmosphère confinée pendant plusieurs jours, afin d'assurer une répartition homogène de l'humidité.

Pour éliminer les causes accidentelles d'erreurs, nous avons répété chaque mesure plusieurs fois en faisant varier les détails de l'essai : éprouvette retournée, serrage modifié, etc. Il faut d'ailleurs remarquer, au sujet de ce dernier point, que de nombreux essais nous avaient déjà convaincu que, sur des éprouvettes normales, le serrage dans les mors n'intervenait pas d'une manière sensible. Cependant, les échantillons humidifiés présentant une grande plasticité, nous avons voulu nous assurer que celle-ci n'intervenait pas pour rendre incertaine la valeur de l'essai.

En réalité, les modifications ainsi apportées ne nous ont donné que de très faibles différences dans la valeur des modules. Les chiffres que nous indiquons sont les moyennes de résultats très voisins.

Les tableaux, que nous donnons plus loin, représentent l'ensemble des valeurs trouvées sur huit échantillons de spruce. Pour chaque éprouvette, nous avons noté l'écartement moyen (e) des couches annuelles, mesuré sur l'ensemble de la masse de l'échantillon.

Les courbes obtenues (*fig.* 27 à 34), tout comme celles que nous avons précédemment données, n'accusent pas une systématique décroissance de la rigidité en fonction de l'augmentation du degré d'humidité. Certaines même présentent un maximum ou un minimum. Ce fait paraît d'autant plus étonnant que, dans les travaux antérieurs, il n'y a nulle part trace d'un tel phénomène.

Nous donnerons de ce fait l'explication suivante.

d. **Module réel et module brut.**

Lorsqu'on travaille un échantillon de bois, on lui donne des dimensions qui ne sont définies avec précision qu'au moment du travail et correspondent au degré d'humidité « actuel » du bois.

Si la teneur en eau change, les dimensions sont modifiées. Si donc, nous cherchons l'élasticité de cette éprouvée dilatée, ce ne sera plus celle d'un cylindre circulaire ayant les dimensions initiales, mais celle d'un cylindre à base sensiblement elliptique (1).

En utilisant la formule

$$E = \frac{128\pi M l_0^3}{T_0 d_0} (\tau + 1,4),$$

(1) Le coefficient de dilatation du bois, en fonction de l'humidité, n'est, en effet, pas le même, suivant que l'on considère une direction radiale ou, au contraire, tangentielle aux couches annuelles.

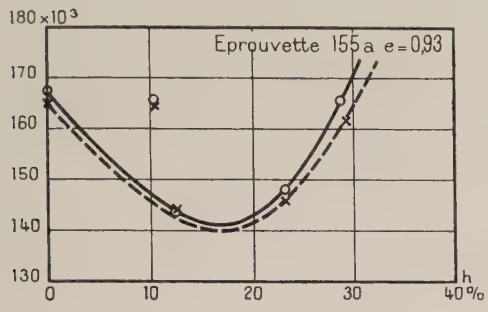


Fig. 27.

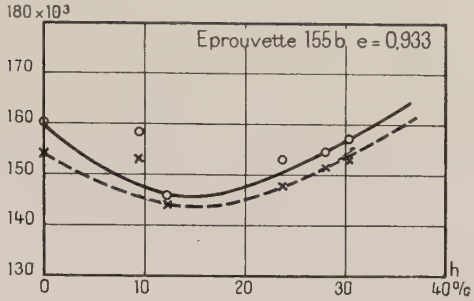


Fig. 28.

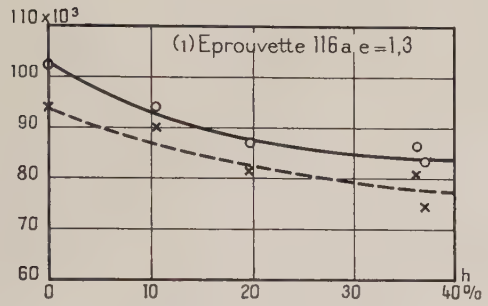


Fig. 29.

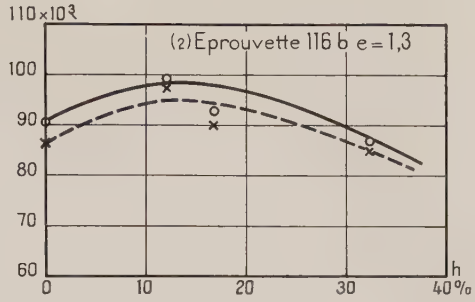


Fig. 30.

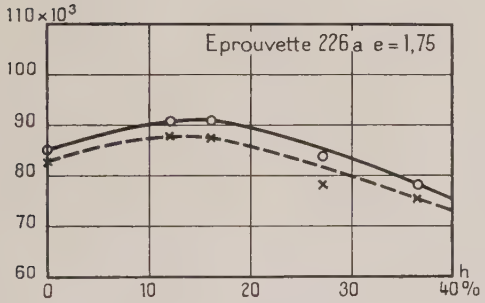


Fig. 31.

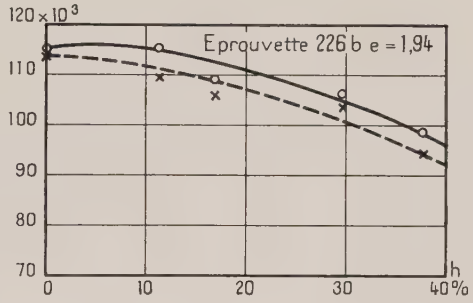


Fig. 32.

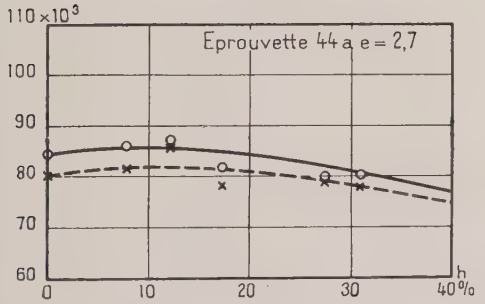


Fig. 33.

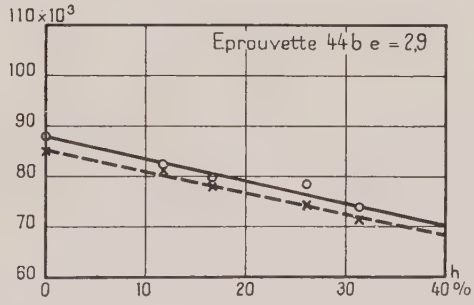


Fig. 34.

Spruce. — Variation du module apparent en fonction du degré hygrométrique.
e, écartement des couches annuelles.

Sens A ————————

Sens B - - - - - - - - -

dans laquelle l_0 est la longueur initiale de l'éprouvette, c'est-à-dire sa longueur *avant le traitement hygrométrique*, et d_0 son diamètre dans le même état (initial), nous obtenons un module brut (ou module apparent).

Ce module brut ne correspond pas à l'élasticité spécifique *actuelle* de l'éprouvette, puisqu'en réalité les dimensions de cette dernière ont varié du fait de l'humidification; cependant, c'est une donnée expérimentale qui a une incontestable utilité puisqu'elle permet de dire comment se comportera élastiquement une éprouvette qui, à l'état sec, a des dimensions données.

Mais, en partant de la valeur expérimentale trouvée pour τ et, en appliquant la formule

$$E = \frac{128\pi M l^3}{T_a d^4}(\tau + 1{,}4)$$

aux dimensions *réelles actuelles* l et d des éprouvettes, nous pouvons chercher quelle est la véritable élasticité de la matière ligneuse; nous obtenons alors le *module réel*.

Les colonnes 6 et 9 des tableaux donnent les valeurs des modules ainsi calculées, et les graphiques (*fig.* 35 à 42) représentent les variations de ces modules réels. Les courbes se rapprochent ainsi remarquablement de celles obtenues par les autres expérimentateurs à l'aide de la méthode statique.

Ainsi, nous arrivons à la conclusion générale, à laquelle nous pouvions d'ailleurs nous attendre, que, quand l'humidité croît, le module élastique décroît. Mais rien ne permet *a priori* d'affirmer que le « module apparent » suit la même variation puisque, dans ce cas, la nature de l'échantillon de bois et ses dimensions varient avec le degré hygrométrique. Les colonnes 5 et 8 et les courbes (*fig.* 27 à 34) donnent l'allure de ce module apparent, allure d'ailleurs très variable avec l'échantillon considéré.

TABLEAUX

donnant, pour divers échantillons de spruce, les variations des modules brut et apparent, en fonction de l'humidité.

ÉPROUVETTE N° 155 *a*. — *Espacement moyen des couches annuelles :* 0mm,93.

POIDS.	DENSITÉ.	HUMIDITÉ.	SENS A.			SENS B.		
			τ.	Module brut.	Module réel.	τ.	Module brut.	Module réel.
39,59	0,513	0 %	479	169 000	194 200	475	167 600	186 000
39,32	0,567	10,5	475	167 600	167 600	470	165 800	165 800
39,88	0,575	12	407	143 700	143 700	405	142 900	143 700
43,78	0,632	23	416	146 800	131 800	421	148 500	133 200
45,56	0,657	28	470	165 800	139 800	457	161 200	138 500
45,65	0,659	28,3	470	165 800	136 700	462	162 900	139 900

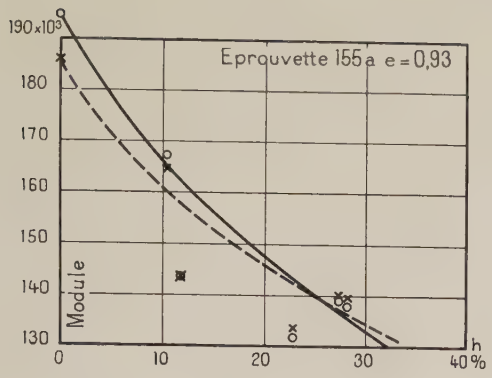


Fig. 35.

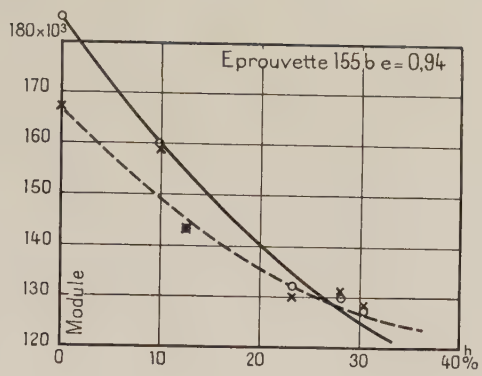


Fig. 36.

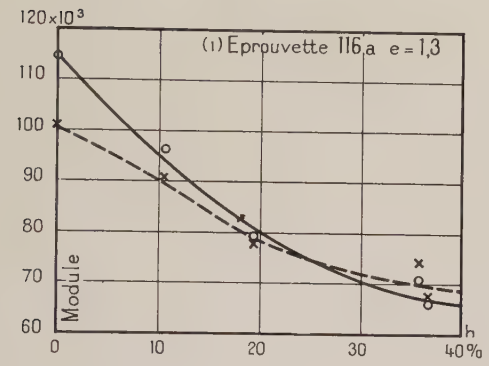


Fig. 37.

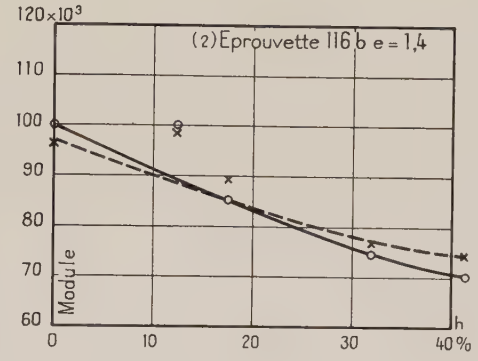


Fig. 38.

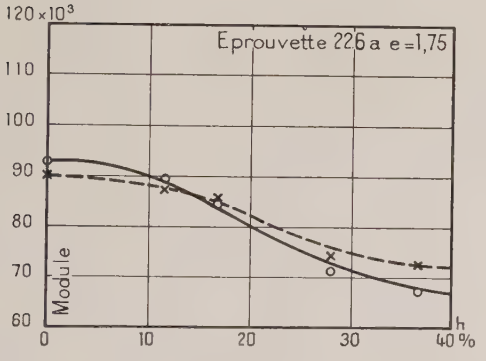


Fig. 39.

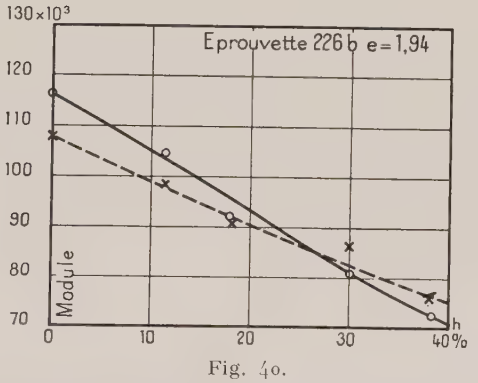


Fig. 40.

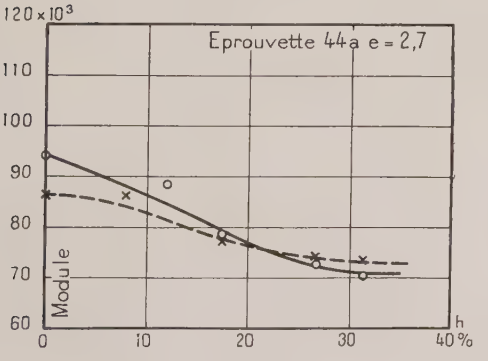


Fig. 41.

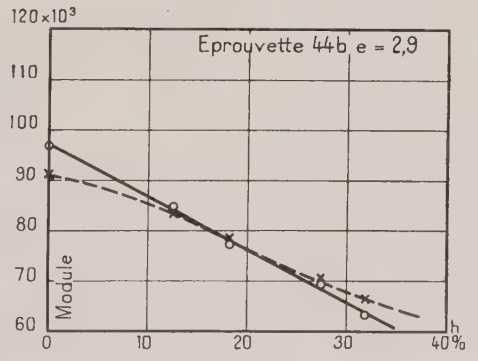


Fig. 42.

Spruce. — Variation du module réel en fonction du degré hygroscopique.

Sens A ———————— Sens B – – – – – – – –

Éprouvette n° 155 *b*. — *Espacement moyen des couches annuelles :* $0^{mm},94$.

POIDS.	DENSITÉ.	HUMIDITÉ.	SENS A.			SENS B.		
			τ.	Module brut.	Module réel.	τ.	Module brut.	Module réel.
		%						
35,66	0,515	0	455	160 500	184 600	438	154 800	166 400
39,28	0,566	9,8	449	158 600	158 600	438	154 800	158 600
39,99	0,577	12,3	412	145 200	142 700	406	143 200	143 200
43,90	0,634	23,4	435	153 500	131 700	418	147 600	129 400
45,65	0,659	28	438	154 800	130 500	430	151 800	130 300
46,55	0,672	30,5	445	157 100	126 700	432	152 500	128 500

Éprouvette n° 116 *a*. — *Espacement moyen des couches annuelles :* $1^{mm},3$.

POIDS.	DENSITÉ.	HUMIDITÉ.	SENS A.			SENS B.		
			τ.	Module brut.	Module réel.	τ.	Module brut.	Module réel.
		%						
23,39	0,337	0	290	102 300	113 600	266	93 900	100 900
25,87	0,374	10,6	270	95 300	95 300	256	90 400	90 400
27,99	0,404	19,7	250	88 200	79 100	230	81 200	77 900
31,86	0,461	36,2	247	87 200	70 300	233	82 200	75 600
31,94	0,462	36,5	237	83 700	65 700	211	74 500	67 800

Éprouvette n° 116 *b*. — *Espacement moyen des couches annuelles :* $1^{mm},4$.

POIDS.	DENSITÉ.	HUMIDITÉ.	SENS A.			SENS B.		
			τ.	Module brut.	Module réel	τ.	Module brut.	Module réel.
		%						
23,19	0,335	0	255	90 000	99 900	250	88 200	94 800
26,00	0,375	12,5	283	99 900	99 900	279	98 500	98 500
27,13	0,391	17	260	91 800	84 500	260	91 800	89 700
30,80	0,444	32,8	248	87 600	73 800	225	79 400	75 200
32,66	0,462	40,8	242	85 400	70 500	223	78 700	74 400

Éprouvette n° 226 *a*. — *Espacement moyen des couches annuelles :* $1^{mm},75$.

POIDS.	DENSITÉ.	HUMIDITÉ.	SENS A.			SENS B.		
			τ.	Module brut.	Module réel.	τ.	Module brut.	Module réel.
		%						
22,65	0,326	0	238	84 100	93 300	238	84 100	90 300
25,38	0,366	12	258	91 100	91 100	248	87 600	87 600
26,42	0,381	16,5	256	90 400	85 600	246	86 800	86 800
29,02	0,418	28	235	83 000	71 300	220	77 700	74 600
30,92	0,446	36,5	220	77 700	66 700	217	76 600	73 500

Éprouvette n° 226 *b*. — *Espacement moyen des couches annuelles :* $1^{mm},94$.

POIDS.	DENSITÉ.	HUMIDITÉ.	SENS A.			SENS B.		
			τ.	Module brut.	Module réel.	τ.	Module brut.	Module réel.
		%						
24,14	0,348	0	288	104 000	115 400	288	104 000	108 600
26,86	0,388	11,3	288	104 000	104 000	279	98 500	98 500
28,28	0,408	17,3	280	98 800	90 200	272	96 100	92 300
31,35	0,452	30	271	95 700	80 700	266	93 900	86 300
33,27	0,480	38	250	88 300	72 800	236	83 400	75 800

Éprouvette n° 44 *a*. — *Espacement moyen des couches annuelles :* $2^{mm},7$.

POIDS.	DENSITÉ.	HUMIDITÉ.	SENS A.			SENS B.		
			τ.	Module brut.	Module réel.	τ.	Module brut.	Module réel.
		%						
23,89	0,335	0	238	84 100	92 000	228	80 500	86 500
25,78	0,372	7,9	241	85 200	85 200	232	81 900	85 200
26,82	0,387	12,2	250	88 300	88 300	244	86 200	88 300
28,03	0,404	17,5	232	81 900	77 500	222	78 400	76 700
30,22	0,436	26,5	229	80 800	72 500	225	79 500	75 200
31,25	0,451	31	227	80 200	70 300	222	78 400	72 700

Éprouvette n° 44 *b*. — *Espacement moyen des couches annuelles :* $2^{mm},9$.

POIDS.	DENSITÉ.	HUMIDITÉ.	SENS A.			SENS B.		
			τ.	Module brut.	Module réel.	τ.	Module brut.	Module réel.
		%						
23,13	0,333	0	254	88 700	97 100	244	86 200	90 000
26,05	0,376	12,5	237	83 700	83 700	236	83 400	83 400
27,16	0,392	17,5	226	79 800	76 700	221	78 000	78 000
29,26	0,412	26,5	223	78 700	69 000	210	74 200	70 200
30,42	0,438	31,5	208	73 400	63 100	205	72 400	66 600

On remarquera de plus que, pour tous les échantillons étudiés : à partir d'un certain taux d'humidité (d'ailleurs variable avec l'essence), le module dans le sens A est toujours légèrement plus faible que dans le sens B. Si nous rapprochons ces résultats de ceux qui sont relatifs aux coefficients de dilatation à l'humidité, nous nous apercevons que dans le sens A, où ce coefficient est le plus grand, le module décroît un peu plus rapidement que dans l'autre sens. On pouvait le prévoir, car, à un maximum de dilatation doit correspondre normalement un minimum de rigidité.

F. — INFLUENCE DE L'INCLINAISON DES FIBRES PAR RAPPORT A L'AXE, SUR LA VALEUR DU MODULE.

Nous avons effectué un certain nombre d'essais destinés à mettre en évidence cette influence. Tous se sont trouvés très concluants. Nous nous contenterons seulement de reproduire l'une des courbes obtenues (*fig.* 43)

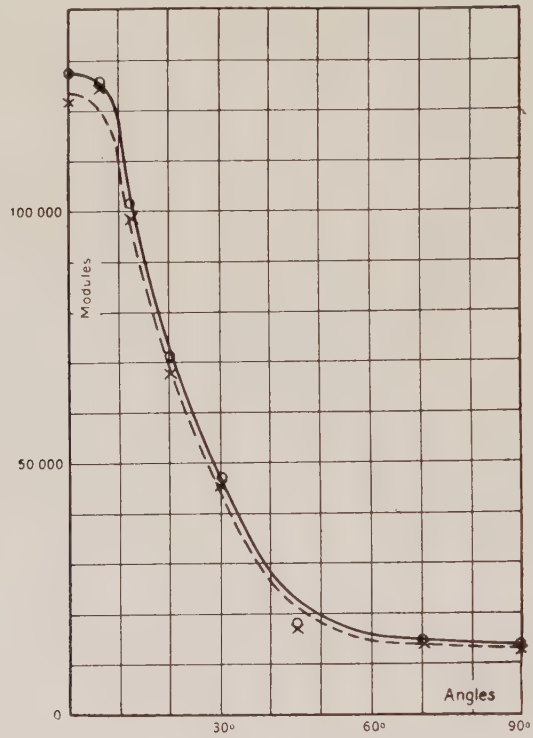


Fig. 43. — Influence sur le module de l'inclinaison de la fibre sur l'axe (hêtre).

montrant que le module varie surtout, quand l'angle croît de 10 à 45°. Cette conclusion concordant parfaitement avec celles obtenues par l'essai statique, nous ne nous y attarderons pas davantage.

G. — COMPARAISON ENTRE L'ESSAI DE FLEXION STATIQUE ET L'ESSAI PENDULAIRE.

1° La méthode pendulaire donne un résultat absolument indépendant de la durée d'application de la charge, celle-ci étant alternative et, en moyenne, nulle. D'ailleurs, cette variation alternative de charge impose à la matière ligneuse des cycles répétés des déformations qui tendent à produire l'accommodation, c'est-à-dire la fixation des propriétés mécaniques.

Nous avons vu précédemment combien, au contraire, l'essai statique de flexion était fonction du temps. Aussi, dans toutes les mesures de ce genre, est-on obligé de préciser la durée et la vitesse d'application de la charge, ce qui confère aux résultats un caractère essentiellement relatif.

2° Reproduisons maintenant un tableau donnant les mesures obtenues sur les *mêmes* éprouvettes dans les deux sortes d'essais (statique et pendulaire).

ESSENCES.	MODULES. — ESSAIS AUX PENDULES.		MODULES. — ESSAIS STATIQUES.		RAPPORTS $\frac{E_p}{E_s}$.	
	Sens A.	Sens B.	Sens A.	Sens B.	Sens A.	Sens B.
Noyer	95 800	96 700	72 600	83 800	1,320	1,154
Peuplier	112 100	122 100	99 000	103 800	1,132	1,176
Pitchpin	85 400	85 400	72 600	75 200	1,176	1,136
Sapin du Nord	141 200	138 100	128 100	121 000	1,102	1,141
Sapin de Russie	124 500	122 100	114 800	121 000	1,084	1,009
Chêne de forêt	91 200	89 200	87 000	83 800	1,046	1,063
Hêtre	133 700	132 700	114 800	114 800	1,164	1,155
Frêne	151 800	157 100	121 000	128 200	1,253	1,225
Pin maritime	121 000	126 100	121 000	128 100	1,000	0,984
Spruce	130 000	132 000	109 000	103 800	1,192	1,272
Teck	64 000	69 800	51 800	57 300	1,234	1,218
Platane	81 800	80 700	77 800	72 600	1,052	1,112
Châtaignier	85 000	82 300	87 100	83 800	0,975	0,982
Orme	93 100	100 500	87 100	90 700	1,069	1,108

Considérant les valeurs des rapports $\frac{E_p}{E_s}$, nous voyons que les valeurs minima et maxima sont respectivement de 0,975 et 1,320. En moyenne, ce rapport est égal, pour le nombre d'essais considérés, à 1,128 dans le sens A et de 1,124 dans le sens B. Ainsi, nous pouvons dire que le module obtenu par l'essai pendulaire est en moyenne sensiblement plus grand que celui obtenu par la méthode statique (de 1/10^{e} de sa valeur environ).

Cette différence systématique ne peut être imputable à des erreurs expérimentales. Elle est vraisemblablement due à ce que, dans l'essai de flexion statique, la charge n'est pas constamment variable autour d'une valeur nulle, comme dans la méthode pendulaire. Elle est, au contraire, constante : il y a réactivité et il se produit un écoulement de la matière. La rigidité mesurée est donc plus faible que dans les essais aux pendules, pendant lesquels cet écoulement n'a pas le temps de se produire.

CHAPITRE III.

ESSAIS D'ÉLASTICITÉ DU BOIS EN TRACTION, COMPRESSION ET TORSION.

A. — TRAVAUX ANTÉRIEURS.

Avant de faire l'exposé de nos différents essais concernant les modules de traction, compression et torsion du bois, résumons brièvement les nombreux travaux effectués sur ces questions.

Parmi les principaux auteurs ayant étudié le traction ou la compression, il faut citer en France : MONNIN [1] qui s'est surtout occupé de la résistance à la rupture et CAMPREDON [2] qui, à la suite d'expériences effectuées à l'École des Eaux et Forêts de Nancy, a appliqué au bois les théories de l'élasticité.

A l'étranger : BAUMANN [3] et CASATI [4] ont fait un certain nombre d'études mettant en évidence l'influence des dimensions de l'éprouvette. HADECK et JANKA [5], ainsi que SCHLYTER et WINBERG [6] ont étudié les variations des propriétés mécaniques en fonction de l'humidité; KOHLMANN [7] et JACKSON [8] ont étudié l'influence de l'inclinaison des fibres par rapport à l'axe de l'éprouvette. Dans les travaux de MEYER-WEGELIN et BRUNN [9], ainsi que dans ceux de KOLLMANN cités plus haut, sont étudiées les relations existant entre le poids spécifique et les propriétés mécaniques; enfin, GRAF [10] a déterminé l'influence des nœuds sur la résistance du bois.

Parmi les auteurs ayant étudié la torsion, nous devons citer : MONNIN, CAMPREDON, BAUMANN dont nous venons d'indiquer les travaux, ainsi que

---

(1) *Loc. cit.*, p. 6.

(2) J. CAMPREDON, *Contribution à l'étude des propriétés élastiques du bois* (*Ann. de l'École Nationale des Eaux et Forêts et de la Station de rech. et expér. forest.*, t. V, fasc. 3, 1935).

(3) *Loc. cit.*, p. 6.

(4) CASATI, *Essais composés sur éprouvettes de dimensions différentes de quelques essences de bois* (*Kongressler Zürich des I.V.M.*, 1932).

(5) A. HADECK et G. JANKA, *Untersuchungen über die Elastizität und Festigkeit des osterreichischen Bauholzer I* (*Fichte Südtirols. Mitt. forstl. Versuchsweser Oesterreich*, Heft 25, Wien, 1900).

(6) R. SCHLYTER und G. WINBERG, *Svenkt Furuvirkes Hallfasthetsegens Kaper och deras Beroende av Fuktighetshalt och Volymvikt* (*Mitt.* 42, Statens Provningsanstalt Stockholm, 1929).

(7) KOHLMANN, *Baning*, Bd. 15, 1934, S. 198.

(8) A. JACKSON, *Ingénieur Holzbau*, Stuttgart, 1921.

(9) H. MAYER-WEGELIN und G. BRÜNN, *Raümgewicht und Druckfestigkeit von Pichtpine, Oregonpine und deutschem Kiefernholz* (*Mitt. Fachaüsschüss Holzfragen*, Heft 4, Berlin, 1932).

(10) GRAF, *Maschinen Bau*, Bd. 8, 1929, S. 642.

Carrington (1) et Horig (2), qui se sont attachés à mesurer les différents coefficients intervenant dans la théorie de l'élasticité appliquée au bois. K. Huber (3) et Kraemer (4) enfin ont étudié l'influence de l'humidité, de l'angle de torsion, ainsi que du poids spécifique.

De tous ces travaux, on peut dégager les principaux résultats suivants, intéressant notre étude :

a. **Compression.**

Les essais de ce genre ont toujours été effectués sur éprouvettes relativement courtes, comprimées sur une presse entre deux plateaux, dont l'un est à rotule. Pour les essais industriels, qui tendent à déterminer la charge de rupture, les éprouvettes qui ont été normalisées pour les essais du bois sont, suivant les pays, de section transversale carrée (France, Suisse, Tchécoslovaquie) ou de section circulaire (Amérique, Angleterre). Remarquons, de plus, que si l'on désigne par l la longueur de l'éprouvette et par e le côté du carré ou le diamètre du cercle constituant sa section transversale, le rapport $\frac{l}{e}$ de ces éprouvettes normalisées est toujours compris entre 1 et 5.

Dans presque tous les cas, les mesures d'allongements ont été faites par les auteurs au moyen de l'extensomètre Hugenberger. En faisant varier le rapport existant entre les dimensions longitudinales et transversales, les expérimentateurs ont trouvé que, lorsque la valeur $\frac{l}{e}$ augmente, la résistance à la compression diminue. Ce phénomène paraît facilement explicable : moins les cellules ligneuses sont maintenues transversalement par les fibres voisines, plus il est facile de les écraser. Mais Tetmayer signale que pour des hauteurs dix à vingt fois plus grandes que le plus petit côté $\left(10 < \frac{l}{e} < 20\right)$, les variations dans les résultats sont négligeables. Il paraîtrait donc normal de mesurer la résistance à la compression sur des éprouvettes telles que $\frac{l}{e}$ soit supérieur à 10. Dans nos essais, cette condition se trouvera toujours être réalisée.

Représentant les variations de longueur de l'éprouvette en fonction de l'effort, les auteurs s'accordent, en général, à trouver des courbes de traction sensiblement rectilignes (*fig.* 44), tandis que les courbes de compression s'incurvent et accusent une forte diminution du rapport $\frac{dF}{de}$ quand l'effort F croît. Notons d'ailleurs qu'en ce qui concerne la comparaison avec nos propres expériences, c'est la partie rectiligne de ces courbes, voisine de l'origine, qui est de toute première importance. Nous verrons dans la suite de ce travail, comment nous nous sommes attaché à l'étude des faibles déformations, afin de préciser la nature du phénomène de flexion.

---

(1) Carrington, *Philosophical Magazine*, I, VI, 41, 1921, p. 206, 848; I, VI, 43, 1922, p. 871; II, VI, 44, 1922, p. 288; I, VI, 45, 1923, p. 1055.

(2) Hörig, *Zeitschr. techn. Physick*, Bd. 12, 1931, S. 369.

(3) Huber, *Zeitschrift*, V D I, Bd 72, 1928, S. 501.

(4) Kraemer, 190 Ber. D V L-Jb 1930, S. 411.

En ce qui concerne l'humidité, les différents auteurs, qui ont étudié la question, ont noté une forte diminution de la résistance élastique en fonction du degré hygrométrique pour des teneurs en eau inférieures à 30 ou 40 pour 100; cette diminution étant d'autant moins sensible que l'on se rapproche davantage de l'état de saturation.

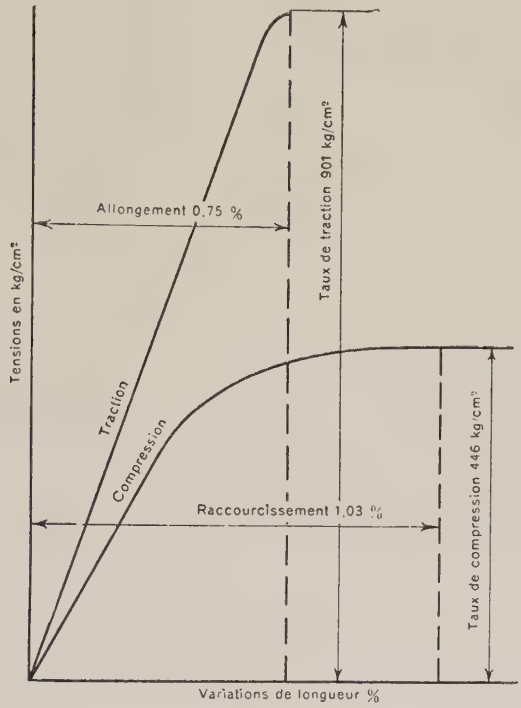


Fig. 44. — Variations des longueurs à la traction et à la compression en fonction des tensions (d'après Bosch).

b. **Traction.**

Les éprouvettes, utilisées pour les essais de traction, présentent une très grande diversité. Sans en donner les nombreuses descriptions, indiquons seulement que toutes, ou presque toutes, sont de section transversale rectangulaire ou carrée. Elles portent chacune à leurs extrémités deux têtes d'assez grandes dimensions, destinées à être serrées dans les mors de la machine de traction. L'avantage de cette disposition, certainement excellente, est d'assurer une bonne répartition des efforts dans la partie étudiée.

Avec des éprouvettes de ce genre, de nombreuses courbes, donnant les allongements en fonction des efforts, ont été tracées. Ce sont des droites jusqu'au voisinage du point de rupture (*fig.* 44). Ce dernier n'est précédé que par une très légère inflexion de la courbe. Nous sommes donc en présence d'un mode de rupture analogue à celui des matériaux fragiles. Les matériaux ductiles, tels que l'acier doux sont, au contraire, caractérisés par un allongement notable, se produisant avant la rupture, sous charge à peu près constante.

c. **Torsion.**

Pour ce genre d'essais, il a été utilisé des éprouvettes de section circulaire ou carrée. Ces dernières ont l'avantage de permettre la mesure séparée des trois modules de torsion du bois. Après avoir fait des essais de ce genre, M. Campredon a appliqué au bois la théorie de l'élasticité des corps anisotropes. Cela lui a permis de déduire, pour diverses essences, les valeurs du coefficient de Poisson dans les trois directions privilégiées (direction des fibres, sens radial, sens tangentiel).

Dans ce qui suit, nous nous sommes proposé d'obtenir de façon très précise les modules de traction, compression et torsion de nos éprouvettes déjà étudiées à la flexion, afin de pouvoir résoudre le problème des rapports, existant entre les divers modules d'élasticité, pour un matériau aussi hétérogène que le bois.

B. — ESSAIS DE TRACTION.

a. **Forme des éprouvettes.**

Nous avons été guidé, dans le choix du type d'éprouvette, par les considérations suivantes :

1° Possibilité d'emploi d'un appareil très précis de mesure des allongements (nous verrons plus loin, pour quelles raisons nous avons adopté l'élasticimètre de Martens, à miroirs).

2° Nécessité d'une bonne répartition des efforts.

3° Possibilité d'effectuer, sur les mêmes éprouvettes, des essais de compression, car l'expérience nous a montré que seuls les essais faits sur les mêmes éprouvettes peuvent donner des résultats intéressant la valeur de la comparaison. Le bois est, en effet, beaucoup trop hétérogène pour que l'on puisse prendre dans une masse, même de dimensions restreintes, des échantillons de propriétés identiques.

La première des conditions énoncées ci-dessus nous fixait les dimensions de la partie de l'éprouvette servant à la mesure. En effet, adoptant comme instrument de mesure des allongements l'extensomètre Martens (dont nous rappelons le principe au paragraphe suivant), la partie utile de l'éprouvette devait avoir au moins 100^{mm} de longueur et sa dimension transversale ne devait guère dépasser 7^{mm}, ce qu'il était possible de réaliser pour des éprouvettes taillées « de fil », c'est-à-dire dans le sens des fibres.

Pour que toutes les fibres soient également tendues et qu'il n'y ait pas de concentrations d'efforts en certains points, une forme convenable devait être donnée aux extrémités. Si cette forme est bonne et si l'on pousse l'essai jusqu'à la rupture, celle-ci doit se produire en un point quelconque de l'éprouvette (il ne doit pas y avoir cassure systématique aux encastrements); les fibres doivent

se rompre bien simultanément et ne doivent pas se détacher les unes des autres par cisaillement et glissement. La zone de rupture doit donc être aussi nette que possible; la présence de nombreux éclis ne pouvant être due qu'à des efforts parasites, venant perturber plus ou moins le phénomène de cassure par traction simple.

Fig. 45. — Types de cassures défectueuses obtenues par traction.

Nous avons fait de nombreux essais, destinés à déterminer le profil optimum. Toutes sortes de cassures furent d'abord obtenues. La figure 45 en montre deux des plus typiques et, en même temps, des plus mauvaises : l'une est produite par concentration d'efforts au droit de l'encastrement; l'autre, par suite d'une longueur insuffisante des têtes, s'est produite par cisaillement pur.

Corrigeant petit à petit les défauts que nous a révélés l'expérience, nous avons adopté la forme représentée par la figure 46. L'éprouvette a 50^{cm} de longueur totale; elle porte aux deux extrémités des têtes de section carrée (20×20^{mm}). Au milieu, se trouve la partie dont nous étudions l'élasticité. Nous lui avons donné une section transversale circulaire, afin de faciliter l'usinage. Cette partie a 120^{mm} de longueur et 7^{mm} de diamètre. Entre chacune des têtes de section carrée et le cylindre de 7^{mm}, se trouvent deux parties cylindriques nécessaires pour tourner l'éprouvette entre les lunettes d'un tour. Ainsi donc, nous avons pu effectuer les mesures sur une base de 100^{mm} de longueur.

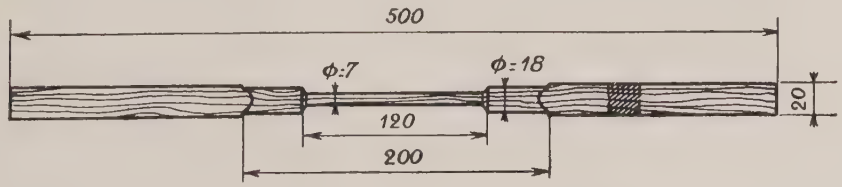


Fig. 46. — Éprouvette de traction-compression.

Faisant alors, avec de telles éprouvettes, une série d'essais poussés jusqu'à la rupture, nous avons obtenu des cassures nettes, se produisant toutes en un endroit quelconque de la partie « utile » (de 7^{mm} de diamètre). La photographie

ci-dessous (*fig.* 47) montre quelques-uns des résultats obtenus. Il est remarquable, qu'avec cette forme d'éprouvettes, aucune rupture ne se soit produite au point de raccordement des deux parties de sections différentes. Il a donc paru inutile de réaliser entre ces deux parties un arrondi circulaire.

La forme et les dimensions que nous avons adoptées pour les éprouvettes permettent donc de satisfaire aux conditions précédemment exposées. Mais les éprouvettes présentent alors l'inconvénient d'être fragiles et, par conséquent, difficiles à travailler. Il faut, pour les réaliser, un tour à métaux, tournant à grande vitesse, muni d'un outil de profil spécial; le tournage entre lunettes est

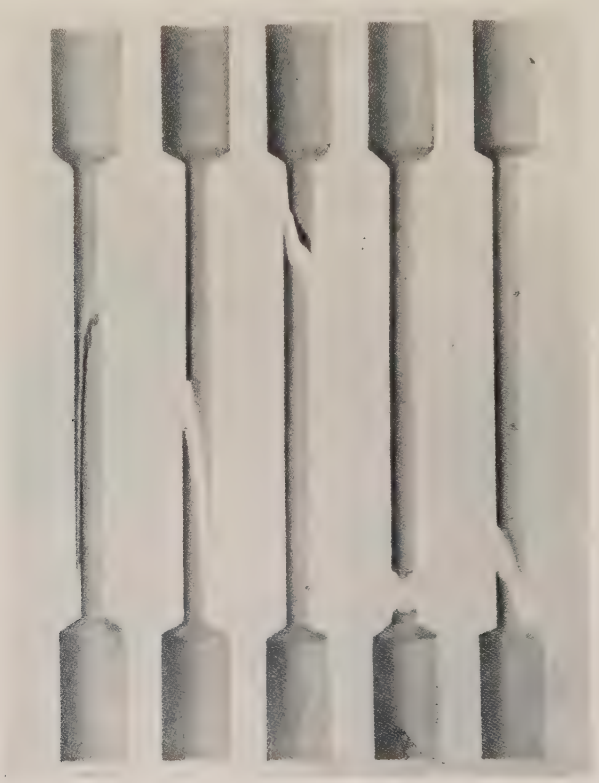


Fig. 47. — Cassures normales obtenues par traction.

nécessaire; encore n'est-on pas à l'abri des ruptures, lorsque s'amorcent des vibrations. Quoi qu'il en soit, cette forme donne des résultats excellents, et elle ne paraît pas plus difficile à réaliser que celles qui sont préconisées par certains auteurs de travaux sur le bois.

b. **Technique des essais.**

L'éprouvette était simplement serrée (*fig.* 48) entre les mors d'une machine de traction (type Trayvou à balance). Étant donnée leur dimension longitudinale, les têtes n'étaient serrées entre les mors que sur une partie de leur longueur.

Les efforts parasites dus à l'enfoncement des mors dans le bois ne pouvaient donc intervenir sur la partie servant à la mesure. Celle-ci travaillait donc en traction simple.

Pour avoir une grande précision dans les mesures et en particulier dans l'étude des déformations peu importantes produites sous faibles charges, il était nécessaire d'employer un appareil susceptible de déceler de très petites variations de longueur. L'élasticimètre Martens semblait donc tout indiqué. Cet appareil possède, d'autre part, un avantage particulièrement précieux pour nous : son mode de fixation et la forme de ses couteaux lui assurent une parfaite adhérence sur l'éprouvette de bois. Enfin, sa construction est prévue pour corriger automatiquement tout glissement éventuel dans les mors et éviter que celui-ci n'influe sur la mesure.

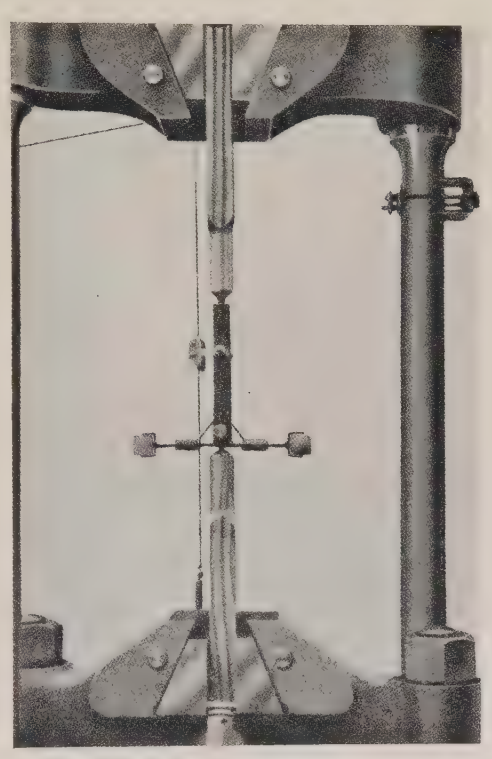


Fig. 48. — Dispositif de traction.

Rappelons le principe de cet appareil :

Deux réglettes B (*fig.* 49), de longueur constante, sont maintenues le long de l'éprouvette au moyen d'une pince à ressort. L'une de leurs extrémités se termine par des couteaux fixes, tandis que l'autre repose sur un petit prisme parallélépipédique. Ce petit prisme se trouve serré entre l'éprouvette et la réglette, qui, à cet endroit, porte une rainure. On réalise ainsi un système différentiel, tel que si l'éprouvette change de longueur, le petit prisme tourne. Reste à mesurer cette rotation. Pour cela, un miroir M, solidaire de chaque prisme, renvoie sur le réticule d'un viseur l'image d'une règle graduée. Les dimensions des prismes, la distance du système optique au miroir, ainsi que la largeur des graduations des règles sont telles que l'une des divisions corresponde à un allongement de 1/1000^{e} de millimètre sur la longueur de base, égale à 100^{mm}. D'autre part, le système optique est tel que l'on peut apprécier sans difficulté le 1/10^{e} de division, ce qui augmente d'autant la précision de la mesure.

L'ensemble du dispositif (réglettes, prismes, miroirs) est parfaitement visible sur les deux photographies reproduites par les figures 48 et 58.

Ainsi que nous l'avons noté ci-dessus, avec un tel dispositif, les couteaux et les prismes, pénétrant très légèrement dans le bois, ne peuvent glisser. Il

nous a été facile de le vérifier : en chargeant, puis en déchargeant l'éprouvette à plusieurs reprises, le retour au zéro a toujours eu lieu exactement et nous n'avons jamais eu de difficultés de ce côté. Par contre, il faut faire très attention, dans des mesures précises, aux frottements internes de la machine de traction.

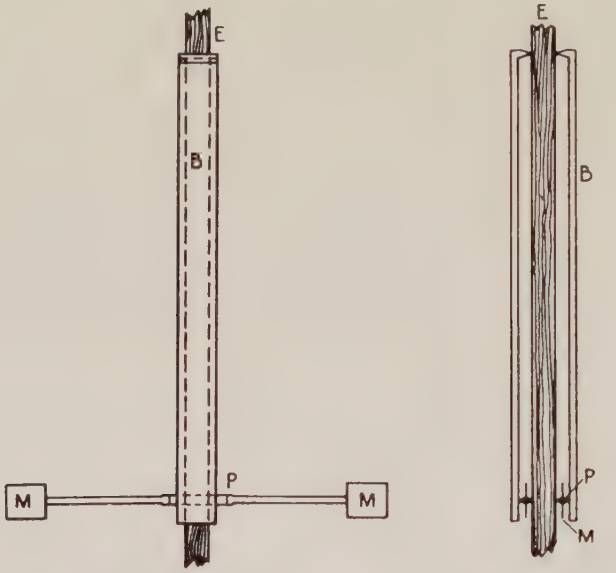


Fig. 49. — Schéma de l'extensomètre Martens.

En particulier, celle dont nous nous sommes servi, bien que d'excellente construction, peut introduire, si l'on n'y prend garde, des erreurs de l'ordre de 5^{kg} sur la valeur de la force totale exercée.

c. **Résultats obtenus.**

1° *Déformations élastiques.* — Avant de déterminer le module d'élasticité des différents échantillons de bois au moyen de l'essai de traction, il était intéressant de rechercher si les résultats fournis par cet essai dépendaient ou non de la durée d'application de la charge. Dans ce but, nous avons fait plusieurs fois l'essai suivant : une éprouvette, munie de l'appareil de mesure, était placée sur la machine et soumise à un effort de traction relativement important. Puis, elle était ainsi laissée chargée durant quelques jours. Jamais, pendant ce laps de temps, nous n'avons pu constater de variation sensible dans l'allongement de l'éprouvette, ainsi qu'en témoignaient les chiffres primitivement indiqués par l'extensomètre Martens et qui n'avaient pas changé. *Dans la traction, il n'y a donc pas d'écoulement sous charge constante, comme cela se produit dans la flexion.*

Dans le tableau ci-dessous, nous donnons à titre d'exemple, en fonction de certains efforts, les valeurs des allongements trouvés dans quelques-uns de nos essais de traction.

EFFORT TOTAL appliqué a l'éprouvette (en kg).		25.	50.	75.	100.	125.	150.	175.	200.
CHARGE UNITAIRE (en kg/cm²)		65.	130.	195.	260.	325.	390.	455.	520.
ALLONGEMENTS exprimés en 1/1000e de mm pour les essences ci-contre :	Sapin du Nord	51	96	146	191	240	285	333	–
	Chêne	49	95	149	191	242	296	–	–
	Pin maritime	50	100	148	194	244	290	–	
	Frêne	51	100	147	194	248	284	335	376
	Platane	72	146	209	279	344	–	–	
	Orme	49	98	146	192	242	294	–	–

Les courbes représentées par les figures 50 à 55 traduisent ces résultats.

Nous voyons, qu'à la traction, les déformations sont *proportionnelles aux charges*. Ceci a lieu jusqu'au voisinage de la rupture. Celle-ci se produit brusquement sans être précédée d'allongement sensible sous charge constante. Le bois se comporte donc bien, à la traction, comme les corps fragiles. Ce résultat confirme, d'ailleurs parfaitement, ceux exposés dans les travaux des expérimentateurs précédents (1).

2° *Conditions de rupture.* — Nous avons poussé la plupart de nos essais jusqu'à la rupture, afin de nous assurer de la valeur de chacun de nos essais par l'examen de la cassure. Ce dernier montre, en effet, si la répartition des efforts a bien été convenable. Les ruptures se sont produites pour des charges variant, non seulement selon l'essence du bois, mais aussi d'une éprouvette à l'autre du même bois. Un plan de rupture assez net s'est toujours présenté. Nous avons remarqué, de plus, que pour une essence donnée, de texture bien définie, ce plan de rupture, qui est toujours oblique ou perpendiculaire à l'axe, paraît faire un angle, grossièrement constant pour la même essence, avec la direction générale des fibres. Ceci, bien entendu, dans le cas où l'axe de l'éprouvette coïncide avec cette direction. Pour des éprouvettes de teck, cet angle était d'environ 90°; pour du sapin du Nord d'excellente qualité : 45°; pour du peuplier : 30°; pour du hêtre : 10°; et pour du sapin du Jura : 5 à 7°. Mais ce fait ne semble pas être en relation directe avec la structure plus ou moins fibreuse du bois, ni avec la résistance élastique.

Il faut noter, d'autre part, que s'il y a, en fait, déformation élastique, jusqu'à la rupture, cette dernière ne se produit pas sous la même charge quand on fait varier la durée d'application de l'effort. A partir d'une certaine valeur de la force exercée, variable avec chaque essence de bois, il suffit de laisser

(1) Références données p. 46.

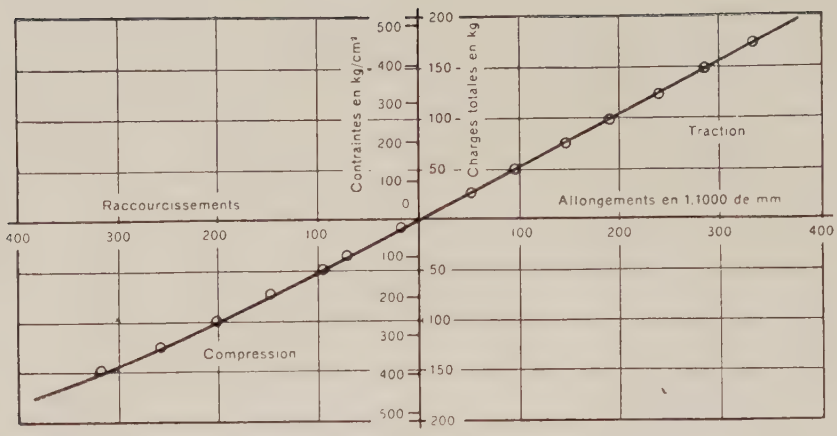


Fig. 50. — Sapin du Nord.

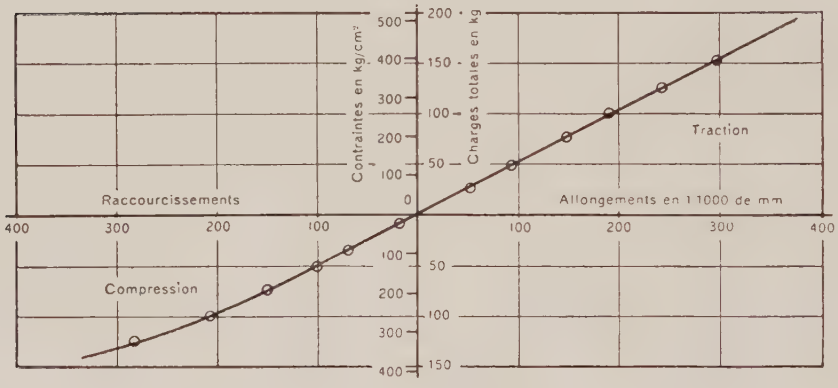


Fig. 51. — Chêne.

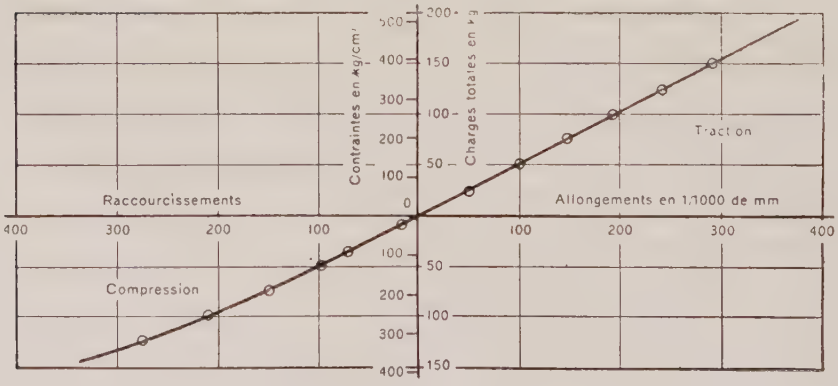


Fig. 52. — Pin maritime.

Essais de traction et de compression dans le sens des fibres.

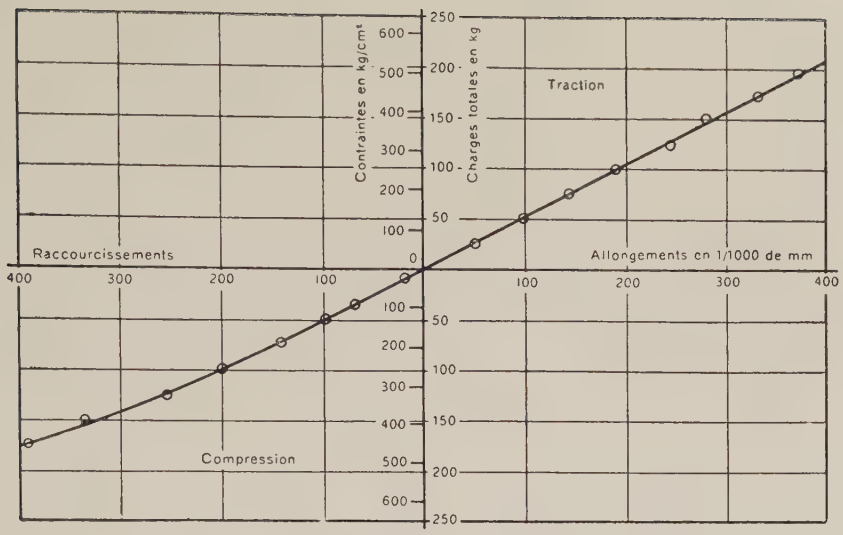


Fig. 53. — Frêne (aubier).

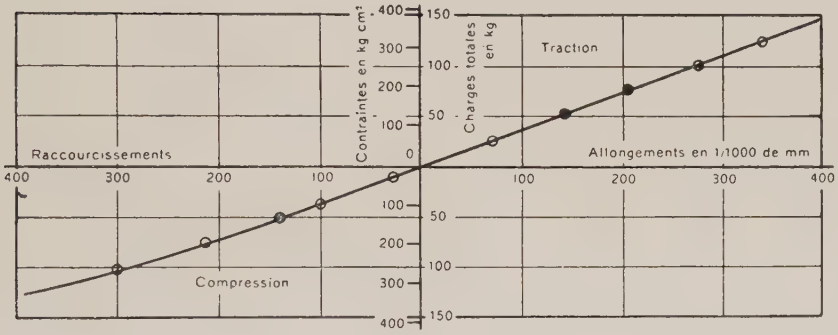


Fig. 54. — Platane.

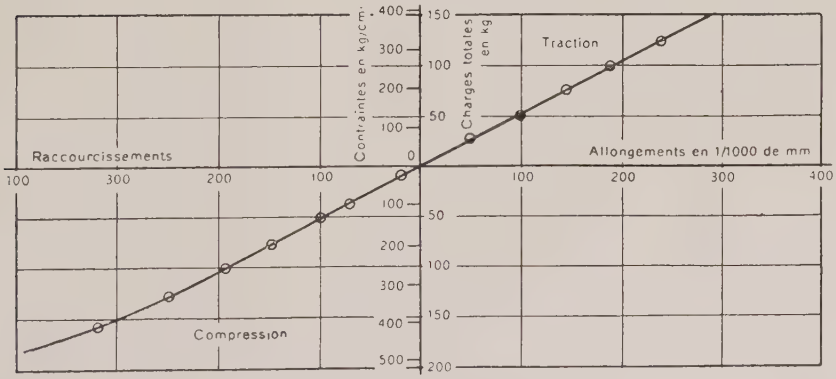


Fig. 55. — Orme.

Essais de traction et de compression dans le sens des fibres.

l'éprouvette chargée pendant un certain temps pour que, finalement sans allongement nouveau, elle se rompre. *C'est là un phénomène important, car il définit la charge statique (et pratique) de rupture par traction.* Il paraît dû au fait que, sous l'effort d'une charge prolongée, certaines fibres finissent par se rompre, amenant une surcharge pour les autres, et ainsi, de proche en proche, la rupture. Malheureusement, le phénomène en question exigerait, pour être étudié avec assez de précision, un nombre considérable d'essais, tous très longs (il s'agirait, en effet, de fixer exactement à partir de quelle charge il n'y a plus risque de rupture en appliquant cette charge pendant un temps très long).

3° *Modules de traction.* — On sait que le module d'élasticité de traction E se déduit des valeurs des allongements Δl par la formule

$$E = \frac{l}{\Delta l} \frac{P}{S},$$

dans laquelle l désigne la longueur initiale de l'éprouvette, Δl son allongement, S la surface de la section transversale et P la charge produisant l'allongement Δl.

Voici les valeurs trouvées dans les conditions normales (éprouvettes longitudinales, humidité 14 pour 100) pour les principales essences ayant servi à nos essais.

ESSENCES.	MODULES DE TRACTION (en kg/cm²).	ESSENCES.	MODULES DE TRACTION (en kg cm²).
Sapin du Nord	134 000	Pitchpin	115 000
Frêne (aubier)	134 000	Frêne (cœur)	113 000
Chêne	132 700	Peuplier	102 700
Spruce	132 500	Sapin du Jura	99 000
Hêtre	131 200	Noyer	90 200
Pin maritime	127 500	Platane	80 300
Orme	122 100	Châtaignier	77 500
Sapin de Russie	119 200	Teck	68 500

d. **Variation du module de traction en fonction du degré hygrométrique.**

Afin de comparer cette variation avec celle obtenue pour le module de flexion, nous avons fait subir à nos éprouvettes de traction les mêmes traitements d'humidification et de dessiccation, que ceux décrits dans le chapitre traitant de la flexion. Nous ne décrirons donc pas à nouveau ces traitements.

Dans le tableau qui suit, nous donnons les variations de modules en fonction du degré d'humidité, obtenues pour six éprouvettes d'essences différentes.

Les courbes de la figure 56 traduisent graphiquement ces résultats. Elles donnent une allure générale de la variation des modules, compte tenu des

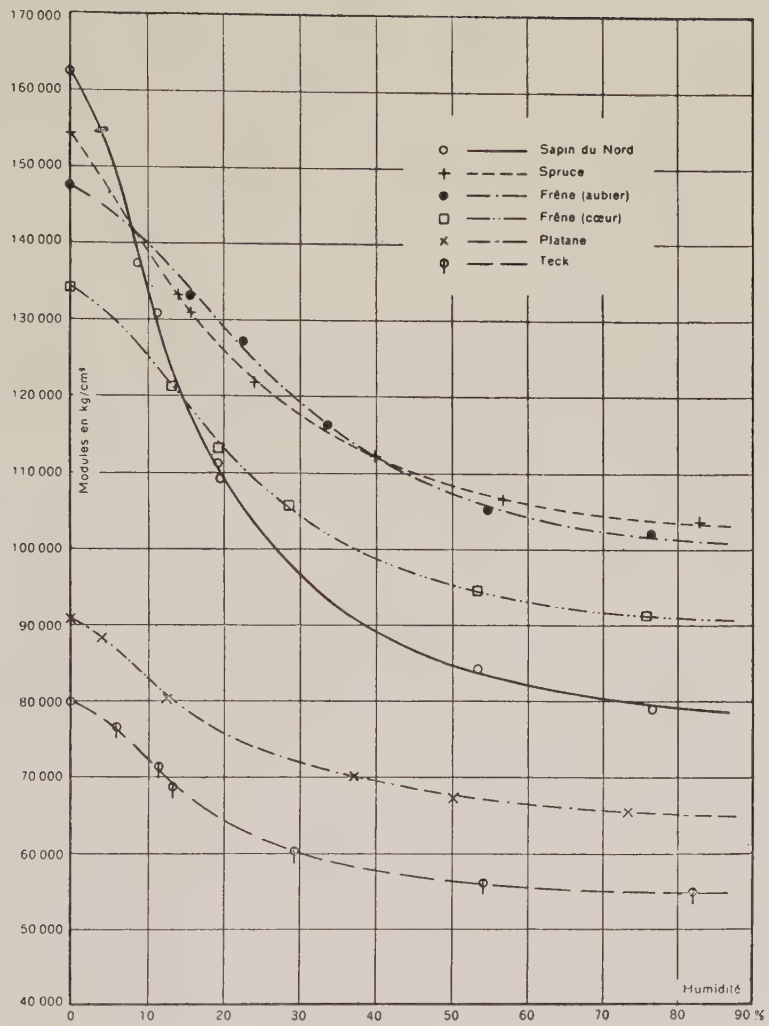


Fig. 56.

Variation du module de traction en fonction du degré hygrométrique.

variations de la section S de l'éprouvette, S étant sa section actuelle (qui augmente lorsque l'humidité croît). Nous voyons que la diminution de résistance se produit surtout lorsque la teneur en eau est inférieure à 40 ou 50 pour 100. Au delà, la courbe tend à devenir parallèle à l'axe horizontal, c'est-à-dire que pour les forts pourcentages d'humidité, le module reste sensiblement constant, quelle que soit l'humidité du bois.

SAPIN DU NORD.		SPRUCE.		FRÊNE (AUBIER).		FRÊNE (CŒUR).		PLATANE.		TECK.	
Taux d'humidité.	Modules (en kg cm²).	Taux d'humidité.	Modules (en kg cm²).	Taux d'humidité.	Modules (en kg cm²).	Taux d'humidité.	Modules (en kg cm²).	Taux d'humidité.	Modules (en kg cm²).	Taux d'humidité.	Modules (en kg cm²).
%		%		%		%		%		%	
0	162 500	0	154 000	0	147 500	0	134 250	0	91 000	0	80 000
9	137 500	14	133 000	15,5	133 000	13,5	121 500	4	88 500	6	76 500
11	130 750	16	131 000	22,5	127 000	19,5	113 000	12,5	80 250	11,5	71 500
19	111 250	24	122 000	33,5	116 500	28,5	106 000	37	70 000	13,5	68 500
19,5	109 000	40	112 500	55	105 000	53,5	94 500	50	67 500	29,5	60 250
53,5	84 250	57,5	106 500	76,5	102 000	76	91 250	73,5	65 500	54	56 000
76,5	70 900	83	103 500	–	–	–		–	–	82	55 000

Insistons sur le fait que nous avons tenu compte dans le calcul des modules ci-dessus, des variations de section dues à l'humidité. Si nous n'en tenions pas compte, du fait que la section varie en même temps que l'humidité, résulterait une certaine compensation, si bien, qu'apparemment, le module paraîtrait diminuer en fonction de la teneur en eau dans des proportions moindres que celles indiquées dans l'étude qu'on vient de faire. Il se passe un phénomène tout à fait analogue à celui que nous avons étudié en détail, dans le cas de la flexion. Bien entendu, ceci se retrouve dans les divers modes de sollicitations (compression, torsion, etc.). Les « modules apparents » obtenus en faisant intervenir la section de l'éprouvette sèche, ont un intérêt pratique évident, car ils permettent de prévoir l'action « totale » de l'humidité. Toutefois, ils ne renseignent pas sur le comportement réel du bois, au point de vue élastique.

C. — ESSAIS DE COMPRESSION.

a. Forme des éprouvettes.

Afin d'obtenir des résultats susceptibles d'être comparés avec les précédents, il était indispensable de faire les essais de compression sur les mêmes éprouvettes que celles de traction. Ainsi, seulement, l'on pouvait être en mesure de trouver les relations existant entre les deux modules de traction et de

compression, sans qu'il puisse y avoir d'erreur provenant des différences d'homogénéité existant entre des éprouvettes différentes.

Or, celles qui sont destinées aux essais de traction devaient être, comme nous l'avons vu, d'assez grande longueur. Utilisées en éprouvettes de compression, elles risquaient de subir un flambement rendant toute observation impossible, même aux faibles charges. Nous avons cherché à obvier à ce grave inconvénient et, pour cela, nous avons conçu et réalisé une machine simple permettant l'essai dans de bonnes conditions.

b. **Dispositif de compression utilisé.**

Pour être acceptable, ce dispositif devait satisfaire aux trois conditions suivantes :

1° Exercer un effort dirigé exactement suivant l'axe de la partie mince de l'éprouvette;

2° S'opposer autant que possible au flambement, d'où la nécessité de guider l'éprouvette par un dispositif approprié;

3° Permettre la mesure des déformations dans toutes les directions, afin de permettre non seulement la mesure des variations de longueur, mais aussi celle du flambement, dès que celui-ci viendrait à se produire.

Nous avons alors réalisé l'appareil représenté par la photographie de la figure 57. L'effort de compression est obtenu au moyen de poids placés sur un plateau accroché à l'extrémité du grand bras d'un levier, dont le rapport d'action est égal à 10. La force verticale est transmise à l'éprouvette par l'intermédiaire d'une vis permettant de maintenir toujours le levier dans la position horizontale et, par suite, de faire exercer l'effort dans la direction de l'axe vertical de l'éprouvette. Celle-ci est, à sa partie inférieure, encastrée sur une grande longueur. De plus, pour éviter le flambement, elle est maintenue, à sa partie supérieure, par deux guides réglables. Ceux-ci, pouvant être déplacés dans toutes les directions, permettent de corriger les défauts possibles de l'éprouvette. Il peut notamment arriver que, par suite d'une erreur de centrage, l'axe de la partie cylindrique ne passe pas rigoureusement par le centre de la partie carrée. Pour que l'effort soit convenablement dirigé, il suffit alors d'un léger déplacement des guides. D'autre part, on règle le serrage de ces derniers, de façon que le bois glisse sans frottement appréciable, tout en laissant cependant le minimum de jeu.

Un tel dispositif permet de comprimer sans flambement des éprouvettes de 7^{mm} de diamètre, ayant la forme déjà indiquée dans notre paragraphe sur les essais de traction, avec des contraintes limites de 3 à 4^{kg} par millimètre carré, selon les essences de bois.

Nous avons dit plus haut que nous devions pouvoir mesurer les déformations dans tous les sens; en effet, dans un essai de compression, il est indispensable de savoir si l'éprouvette flambe, dans quelle direction, et de quelle quantité.

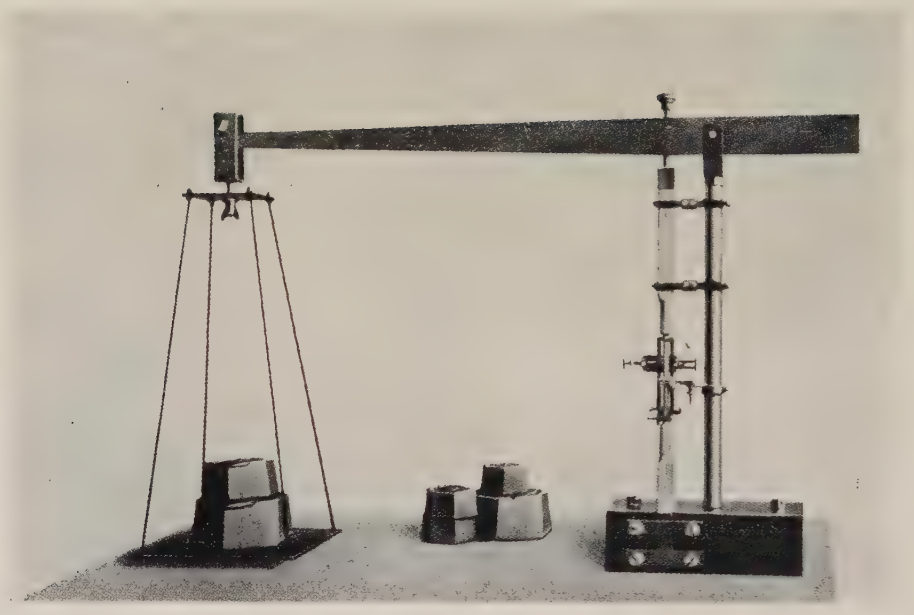


Fig. 57. — Machine de compression pour longues éprouvettes de bois.

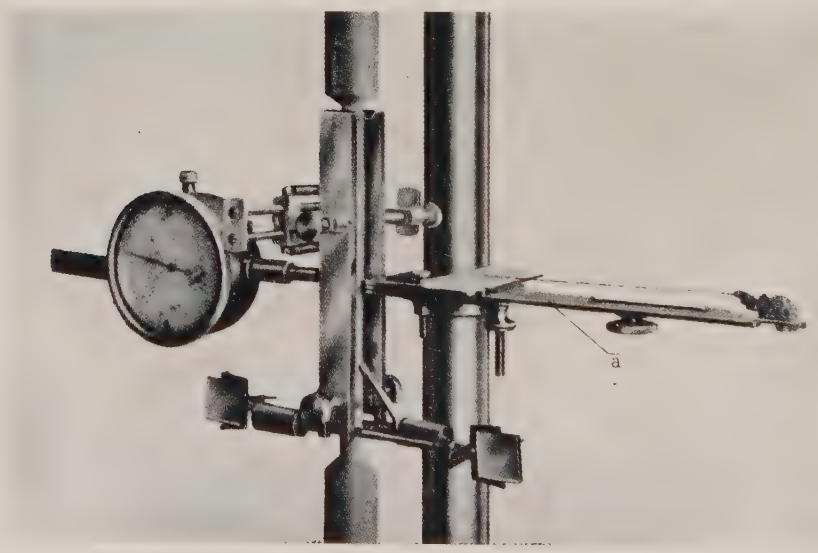


Fig. 58. — Mesures des déformations de l'éprouvette dans l'essai de compression.

On distingue : l'extensomètre et ses miroirs, le tensomètre Hugenberger (indiqué par *a*) et le comparateur.

Pour cela, il suffit de mesurer au milieu de sa longueur les flèches prises dans deux directions transversales perpendiculaires. La photographie (*fig.* 58) montre comment nous avons réalisé ce but pratiquement. Un tensomètre Hugenberger (que l'on voit placé horizontalement en *a*) est fixé au bâti d'une manière rigide. L'extrémité de son levier venant, d'autre part, pénétrer très légèrement dans l'éprouvette de bois, tout déplacement latéral de celle-ci est accusé par l'aiguille. Pour permettre la mesure d'un déplacement perpendiculaire au précédent, on a placé un comparateur dont l'extrémité de la tige vient simplement s'appuyer sur l'éprouvette. On peut ainsi déceler tout flambement produisant une flèche de l'ordre du 1/100e de millimètre, c'est-à-dire que, pratiquement, on est certain de l'instant où l'éprouvette cesse de travailler en compression pure (sans flambement).

Nous avons tenu à nous assurer qu'avec un tel dispositif, les résultats n'étaient troublés par aucune cause d'erreur. Nous avons notamment vérifié que les guides n'introduisaient aucune résistance de frottement appréciable. Pour cela, nous avons chargé et déchargé l'éprouvette à plusieurs reprises sans toucher au dispositif de mesure. Nous avons toujours constaté le retour à la déformation nulle : s'il y avait eu frottement, celui-ci aurait évidemment empêché l'éprouvette de reprendre intégralement sa forme initiale au moment où elle n'était plus chargée. Il ne faut d'ailleurs pas s'étonner de ce fait, étant donné que l'effort est exercé suivant l'axe et que les guides réglables ne sont destinés qu'à empêcher des flambements éventuels de se produire.

c. **Résultats obtenus.**

1. *Déformations élastiques.* — Pour les mêmes éprouvettes que celles déjà étudiées à la traction, nous donnons ci-dessous les valeurs des diminutions de longueur en fonction des efforts correspondants, au cours des essais de compression.

EFFORT TOTAL APPLIQUÉ A L'ÉPROUVETTE (en kg).		10.	36.	50.	75.	100.	125.	150.	175.
CHARGE UNITAIRE (en kg/cm²)		26.	93,5.	130.	195.	260.	325.	390.	455.
VARIATIONS DE LONGUEUR exprimées en 1/1000e de mm pour les essences ci-contre.	Sapin du Nord	18	70	97	148	202	259	319	
	Chêne	17	69	100	155	209	282	–	–
	Pin maritime	16	71	98	149	210	276	–	–
	Frêne	18	67	95	141	200	254	333	390
	Platane	25	50	139	218	300	–	–	
	Orme	19	70	98	147	193	249	320	

A ces chiffres correspondent les parties de courbes relatives à la compression des figures 50 à 55. De ces graphiques, nous pouvons déduire les résultats

généraux suivants. Pour de faibles contraintes (inférieures à environ 200^{kg} par centimètre carré), les courbes déformation-effort sont sensiblement des droites. Plus loin de l'origine, elles s'incurvent vers l'axe des déformations. Malheureusement, la forme de nos éprouvettes ne nous a pas permis de construire ces courbes jusqu'à la rupture par compression simple. Nous arrêtions, en effet, nos essais, dès qu'un très léger flambement se produisait.

Quoi qu'il en soit, nous pouvons déduire avec précision de ces courbes, la manière dont se comporte le bois pour les faibles déformations, et c'est là pour nous l'essentiel (1).

Accessoirement, nous avons pu observer que tout flambement amorcé se continue sous l'action de la charge l'ayant provoqué. La flèche augmente d'abord d'une façon presque insensible, puis croît de plus en plus vite et finit par amener la rupture de l'éprouvette. Si l'on décharge avant que le flambement ne se soit accentué ainsi brusquement, on constate que l'éprouvette ne revient pas à sa longueur initiale. Il y a donc eu des déformations permanentes, localisées surtout au voisinage des encastrements (ceci est d'ailleurs mis en évidence par le fait qu'une éprouvette déformée par flambement et soumise à l'essai de traction casse toujours aux encastrements). Ces quelques remarques suffisent à nous montrer que, par cette méthode, une étude du flambement du bois pourrait être faite de manière pratique.

2. *Modules de compression.* — Des valeurs trouvées pour les déformations Δl en fonction des efforts P et des dimensions initiales l et S de l'éprouvette, nous déduisons les modules de compression par la formule classique

$$E = \frac{l}{\Delta l} \frac{P}{S}.$$

Dans le tableau qui suit, nous donnons les valeurs ainsi calculées dans les conditions normales, sur les échantillons précédemment essayés à la traction.

ESSENCES.	MODULES DE COMPRESSION (en kg cm^2).	ESSENCES.	MODULES DE COMPRESSION (en kg cm^2).
Noyer	92 500	Frêne (cœur)	117 000
Peuplier	104 800	Frêne (aubier)	137 600
Pitchpin	112 900	Pin maritime	124 200
Sapin du Jura	100 200	Spruce	135 100
Sapin du Nord	131 200	Teck	70 100
Sapin de Russie	122 800	Platane	83 700
Chêne	129 800	Châtaignier	75 100
Hêtre	133 600	Orme	119 100

(1) De nombreux expérimentateurs, opérant par les méthodes statiques habituelles, ont d'ailleurs montré que, pour de fortes charges, les courbes des déformations en fonction des efforts de compression s'incurvent, ainsi que nous venons de le voir. D'une manière générale, plus la charge croît et plus le module est faible.

3. *Variation du module de compression en fonction du degré hygrométrique du bois.* — En même temps que nous mesurions les modules de traction sur des éprouvettes dont nous faisions varier la teneur en eau, nous avons noté les variations des modules de compression, qui sont groupées ci-dessous.

SAPIN DU NORD.		SPRUCE.		FRÊNE (AUBIER).		FRÊNE (CŒUR).		PLATANE.		TECK.	
Taux d'humidité.	Modules (en kg/cm²).	Taux d'humidité.	Modules (en kg/cm²).	Taux d'humidité.	Modules (en kg/cm²).	Taux d'humidité.	Modules (en kg/cm²).	Taux d'humidité.	Modules (en kg/cm²).	Taux d'humidité.	Modules (en kg/cm²).
%		%		%		%		%		%	
0	162 500	0	158 000	0	143 000	0	138 500	0	89 200	0	78 000
8,5	137 500	14,5	132 000	16,5	113 000	15	135 500	4,5	87 000	5	77 000
11	130 500	15,5	130 000	22,5	104 500	19,5	129 000	12	80 000	11	72 000
20	109 500	23,5	120 500	33	93 400	29,5	110 000	37,5	74 500	12	70 500
53	82 500	40,2	111 000	55,5	80 800	51	85 000	49,6	73 500	28	60 600
77,5	77 900	57	106 000	77,5	76 000	76	78 500	73,5	72 400	54	56 500
–	–	82,5	103 000	–	–	–	–	–	–	82,5	54 700

La figure 59 représente graphiquement ces diverses variations de modules. Comme dans le cas des valeurs obtenues par l'essai de traction, nous avons tenu compte des variations de section de l'éprouvette, c'est-à-dire que, dans le calcul des modules, nous avons fait intervenir la surface réelle d'une section transversale de l'éprouvette et non la surface initiale (c'est-à-dire celle de l'éprouvette desséchée (1). Si nous comparons les courbes des figures 56 et 59, nous constatons que les modules de traction et de compression suivent, en fonction du degré hygrométrique, des variations à peu près analogues, ne différant que très légèrement avec les diverses essences.

Qu'il s'agisse de sollicitations de traction ou de compression, quand l'humidité croît, le module réel décroît rapidement pour les teneurs en eau inférieures à 40 ou 50 pour 100. Au delà, la variation devient moins sensible.

Le module de compression paraît cependant diminuer un peu plus rapidement que celui de traction, quand le poids d'eau contenu dans l'éprouvette augmente. Il paraît également diminuer dans des proportions un peu plus fortes pour certaines essences que pour d'autres. Mais les courbes sont trop différentes en fonction des variétés de bois, pour que nous puissions énoncer des lois générales précises, sur l'influence de l'humidité sur les propriétés mécaniques du bois.

(1) *Voir*, à ce sujet, les explications données p. 38 et 58, en ce qui concerne les variations des modules de flexion et de traction avec le degré d'humidité.

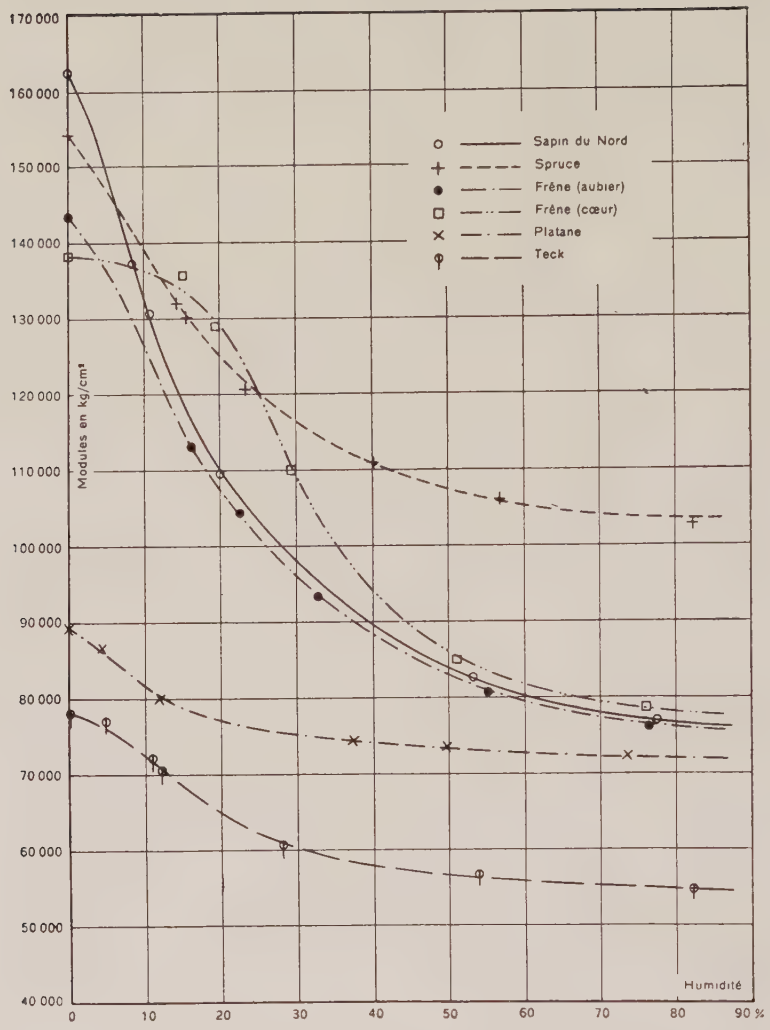


Fig. 59. — Variation du module de compression en fonction du degré hygrométrique.

D. — ESSAIS DE TORSION.

Des essais précédents, il résulte que :

1° La traction et la compression ne produisent pas dans le bois des phénomènes d'écoulement sous charge constante. Les résultats obtenus ainsi, en ce qui concerne les mesures d'élasticité, ne sont donc pas faussés ou masqués et présentent, par suite, une valeur absolue incontestable.

2° La flexion, au contraire, est accompagnée de phénomènes de glissement et d'écoulement, particulièrement importants dans les essais statiques.

Nous avons vu, à ce sujet, les différences importantes existant entre les résultats des deux modes d'essais : à charge moyenne nulle (pendulaire) et à charge constante (statique).

Nous avons alors pensé qu'il serait intéressant d'étudier également le bois à la torsion : d'une part, aux sollicitations alternées; d'autre part, sous l'influence d'un couple constant en valeur et en direction.

Désirant comparer deux modes d'essais, sans chercher à faire une étude complète des modules de glissement pour la matière anisotrope qu'est le bois, nous avons uniquement effectué nos essais sur les éprouvettes circulaires déjà utilisées, et dont la direction des fibres est parallèle à l'axe.

I. — **Essais statiques.**

a. Principe de la méthode et dispositif utilisé. — Une éprouvette étant encastrée à une extrémité et pouvant tourner librement à l'autre, il suffit, pour mesurer le module de torsion, d'appliquer un couple déterminé à l'extrémité libre et d'observer sa rotation au moyen d'un dispositif mécanique ou optique. La seule précaution à prendre est de produire la torsion sans que l'éprouvette fléchisse. Pratiquement, nous avons opéré de la façon suivante (*fig.* 60 et 61).

L'éprouvette E, disposée horizontalement, est encastrée à l'une de ses extrémités dans une partie fixe, constituée par deux mors pouvant être serrés au moyen de vis. Ces mors sont usinés de façon que la tête de l'éprouvette soit fixée dans un trou cylindrique de même diamètre qu'elle. L'autre extrémité est serrée dans un manchon (M), sur lequel est fixée une tige (*t*), servant de bras de levier. Un plateau (P), portant des poids, est accroché à la tige en un point, dont on peut modifier à volonté la position. On obtient ainsi un couple de valeur connue et réglable. Pour éviter toute flexion parasite, une vis (V), à pointe fine, solidaire du manchon, vient s'appuyer par sa pointe sur un plan d'acier réglable en hauteur. Il y a ainsi pendant la torsion une rotation sans frottement, autour d'une pointe, à la hauteur de l'axe de l'éprouvette.

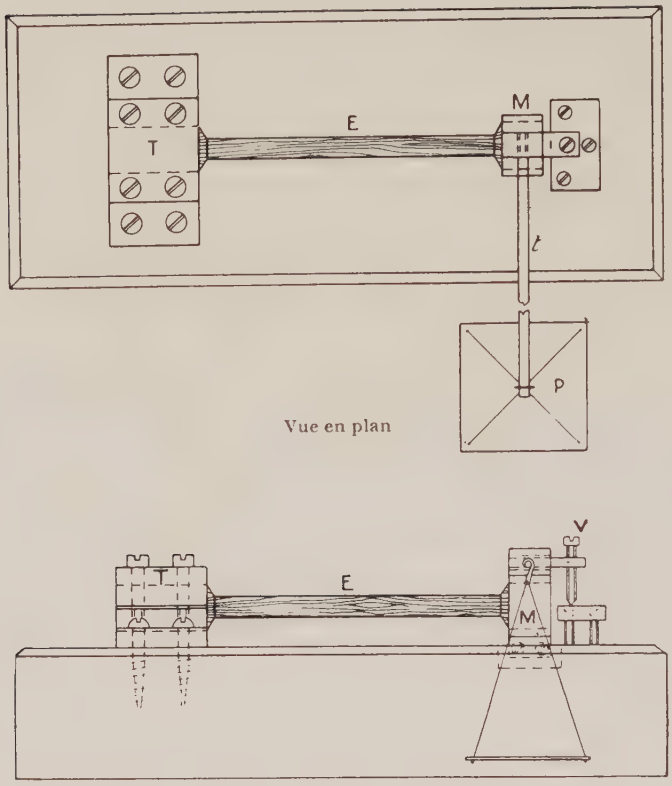
Deux miroirs (*m*), placés sur l'éprouvette à une certaine distance l'un de l'autre et à quelques centimètres des encastrements permettent de mesurer l'angle de rotation θ correspondant à la distance λ (entre les deux miroirs) mesurée le long de l'axe. On élimine ainsi complètement les efforts perturbateurs pouvant être dus aux encastrements. Un tel dispositif permet d'opérer soit sur nos éprouvettes de flexion, soit sur celles ayant servi aux essais de traction et de compression.

Un calcul classique donne le module moyen G en fonction de l'angle θ de rotation. Si M est le couple appliqué, λ la longueur de l'éprouvette, et τ son moment d'inertie polaire par rapport à l'axe, θ est donné par la relation

$$\theta = \frac{M\lambda}{GJ},$$

donc,

$$G = \frac{M\lambda}{J\theta}.$$



Vue en plan

Vue de profil.

Fig. 60.

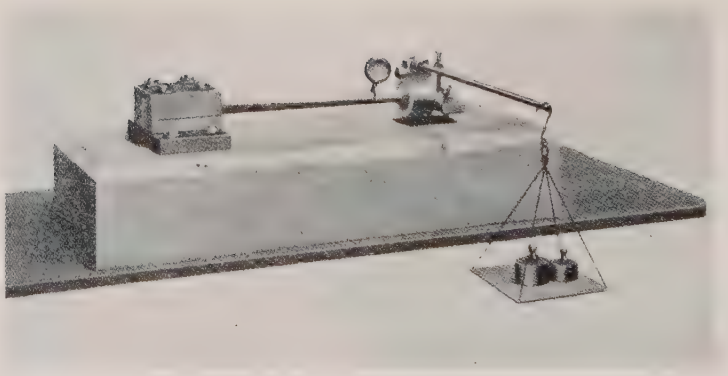


Fig. 61. — Dispositif de torsion statique.

Pour une charge P, située à a centimètres de l'axe, le couple M est

$$M = Pa.$$

Pour une éprouvette cylindrique de diamètre d, le moment d'inertie polaire est

$$J = \frac{\pi d^4}{32},$$

d'où, finalement,

$$G = \frac{32 Pa\lambda}{\pi d^4 \theta}.$$

Dans nos essais, nous avons adopté une longueur utile (comptée entre les miroirs) de 20^{cm}, pour les éprouvettes de 18^{mm} de diamètre, et de 10^{cm} pour celles de 7^{mm}.

b. Résultats obtenus :

1° Déformations élastiques et écoulement.

Chargeant l'éprouvette de différents poids, nous avons remarqué des phénomènes tout à fait analogues à ceux observés dans les essais de flexion. Il se produit notamment une accommodation, de sorte que la mesure de l'angle doit être faite après plusieurs charges et décharges successives (1).

D'autre part, il se produit, sous l'effet d'un couple constant, une torsion « réactive » correspondant à une sorte d'écoulement, d'autant plus rapide que la charge est plus forte, ce qui oblige à faire la mesure de l'angle, dès l'application de la charge. Nous n'avons pas cru devoir reproduire ici, ainsi que nous l'avons fait pour la flexion, des courbes d'écoulement. L'allure générale du phénomène est la même, mais il ne fait pas l'objet principal de notre étude.

En prenant quelques précautions destinées à éviter l'influence des deux causes d'erreur que nous venons de signaler, on arrive à de bons résultats, très concordants pour une même éprouvette. Nous nous en sommes assuré en retournant, bout pour bout, un certain nombre des éprouvettes essayées : aucune différence sensible ne fut trouvée. Mais, il serait impossible de faire la mesure avec des contraintes dépassant une certaine valeur, car l'écoulement serait trop rapide pour permettre une lecture exacte.

Afin de préciser comment le bois travaille à la torsion, sous l'influence d'un couple statique, nous avons tracé, pour chaque échantillon étudié, une courbe donnant les déplacements du spot (c'est-à-dire les angles de torsion) en fonction de la contrainte (ou du couple). Nous donnons (*fig.* 62) quelques-unes de ces courbes. Celles-ci s'infléchissent très légèrement vers l'axe des déformations, c'est-à-dire que la résistance diminue légèrement lorsque la contrainte croît. Pour d'assez faibles déformations, on peut admettre que l'angle de rotation

(1) *Voir*, à ce sujet, ce qui a été dit plus haut dans le cas de la flexion.

est très sensiblement proportionnel à la charge, à condition de faire une mesure rapide qui élimine l'influence de l'écoulement en fonction du temps.

2° Modules de torsion.

Dans le tableau ci-après, nous donnons quelques valeurs obtenues pour le module de torsion de différents échantillons. En regard, nous avons porté

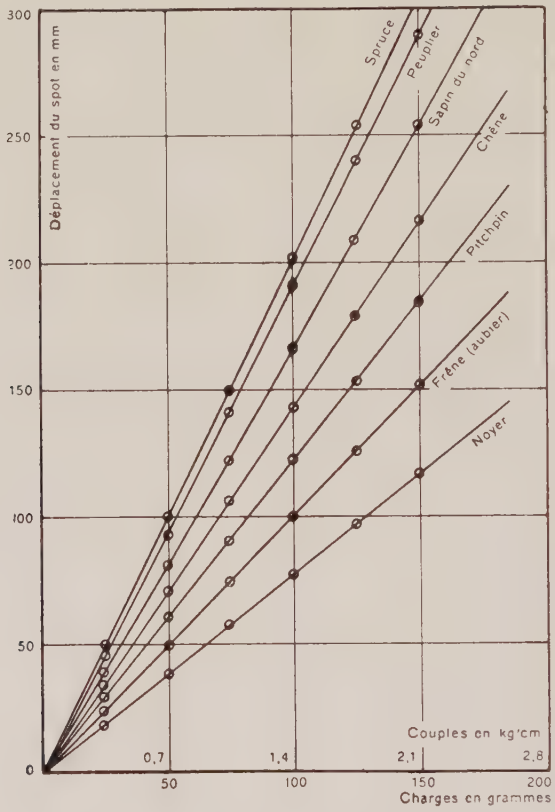


Fig. 62. — Étude de la torsion statique.

Déplacement du spot en fonction du couple.

pour chaque éprouvette les valeurs $\frac{Es}{Gs}$ et $\frac{Ep}{Gs}$, c'est-à-dire les rapports entre :

α. Les modules de flexion et ceux de torsion obtenus par méthode statique.

β. Les modules de flexion pendulaire et ceux de torsion statique (1).

(1) Ceci est donné à titre purement indicatif car, ainsi que le montre ce travail, il n'est intéressant de comparer pour un corps comme le bois que des résultats dépendant de sollicitations faisant intervenir les mêmes propriétés mécaniques.

ESSENCES.	MODULES DE TORSION G_s. (en kg/cm²).	RAPPORTS $\frac{E_s}{G_s}$.	RAPPORTS $\frac{E_p}{G_s}$.
Pitchpin	8 310	15,35	17,13
Chêne	7 210	14,98	18,00
Acajou	5 360	14,25	16,06
Sapin du Jura	6 320	13,87	15,51
Okoumé	6 030	13,69	15,00
Peuplier	5 060	13,17	16,52
Frêne	9 150	13,06	14,34
Acacia	11 310	12,12	14,38
Hêtre	8 570	12,02	15,08
Charme	9 050	11,45	12,76
Cormier	8 140	11,26	13,15
Noyer	8 580	8,99	9,55

Nous voyons ainsi que, pour l'ensemble des échantillons essayés, le module de torsion est compris entre 5000 et 12 000^{kg} par centimètre carré. De plus, le rapport moyen entre les modules de flexion et de torsion obtenus par des méthodes de principe comparable (statique) est d'environ 13 (1). Nous retiendrons qu'il est sensiblement compris entre 12 et 15. Mais, bien entendu, il ne s'agit que d'un ordre de grandeur des différents rapports. Si l'on voulait fixer exactement comment les modules de flexion et de torsion se trouvent reliés entre eux pour une même essence, il serait nécessaire de faire l'étude complète de cette essence.

II. — **Essais de torsion à charge moyenne nulle (mesures par pendule de torsion).**

a. Principe de la méthode et dispositif expérimental.

Nous avons utilisé le système classique qui consiste à suspendre un équipage mobile à l'extrémité inférieure de l'éprouvette à étudier, l'autre extrémité étant encastrée verticalement dans un mandrin fixe. Donnant une impulsion de torsion au pendule, celui-ci se met à osciller autour de sa position d'équilibre; on sait que dans le cas d'une tige homogène et isotrope, pour des oscillations suffisamment petites, la durée des oscillations est indépendante de l'amplitude et que le couple de torsion de l'éprouvette ne dépend pas du poids qui lui est suspendu.

Dans notre dispositif (*fig.* 63), l'éprouvette de bois, suspendue verticalement, est serrée dans un mandrin supérieur jouant le rôle d'encastrement fixe.

---

(1) Le rapport moyen $\frac{E_p}{G_s}$, voisin de 15, est naturellement plus grand que $\frac{E_s}{G_s}$, puisque le module de flexion E_p, mesuré par la méthode pendulaire, est toujours plus grand que celui mesuré par la méthode statique E_s.

L'équipage mobile est constitué par une masse centrale cylindrique en acier, traversée par une tige qui supporte deux masses symétriques réglables, dont la position fait varier le moment d'inertie du système oscillant. Cet équipage mobile est relié à l'échantillon de bois par l'intermédiaire d'un mandrin à serrage concentrique par cône. Les éprouvettes utilisées sont celles déjà employées pour nos mesures de flexion et de torsion, de façon que les résultats soient aussi comparables que possible les uns avec les autres.

Nous avons emprunté le système de lancement du pendule à M. Ravilly, qui le décrit ainsi dans son travail sur la torsion alternée des fils métalliques [1] :

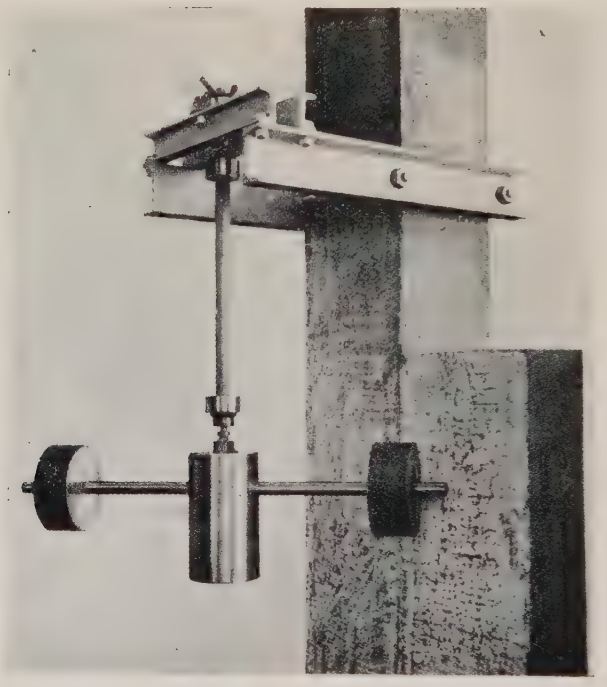


Fig. 63. — Pendule de torsion pour l'étude d'éprouvettes de bois.

« Le lancement du pendule s'effectue en imposant une rotation au mandrin supérieur, ce qui est possible grâce à son montage particulier. Il est, en effet, susceptible de tourner à frottement doux dans la pièce qui lui sert de support, et sa rotation, commandée par un levier, est limitée par deux butées, dont l'une est fixe et l'autre réglable à volonté. Grâce à ce système, le pendule part sans la moindre perturbation. La vitesse de rotation du mandrin est grande par rapport à la vitesse maxima du pendule et ce dernier oscille toujours à partir de la même amplitude initiale. »

---

[1] E. Ravilly, *Contribution à l'étude de la rupture des fils métalliques soumis à des torsions alternées* (*Publications scientifiques et techniques du Ministère de l'Air*, n° 120).

Ajoutons que dans le cas d'une éprouvette de bois, celle-ci ayant une rigidité à la flexion importante, pour que le système soit efficace, c'est-à-dire permette le lancement sans perturbation, l'axe de l'éprouvette et l'axe de rotation du mandrin doivent coïncider exactement et être bien verticaux. S'il n'en était pas ainsi, le lancement amorcerait des oscillations parasites de flexion qui viendraient troubler le phénomène.

Un miroir, fixé sur la masse cylindrique centrale, permet l'enregistrement des mouvements du pendule sur un cylindre photographique à axe horizontal, tournant à vitesse constante et situé à une distance égale à la longueur du rayon de courbure du miroir (soit 1^m). L'image d'un filament vertical, renvoyée par le miroir, se forme sur la fente horizontale de l'appareil enregistreur. C'est donc pratiquement un point lumineux qui vient impressionner le papier sensible.

Notons, d'autre part, que pour obtenir des images correctes, c'est-à-dire des courbes ne chevauchant pas plusieurs fois l'une sur l'autre, la lampe s'éclaire exactement pendant deux tours du cylindre enregistreur. Il nous est facile d'obtenir ce résultat, même en opérant dans l'obscurité complète, en utilisant un petit commutateur automatique très simple, qui assure de lui-même l'allumage et l'extinction de la lampe au moment voulu. Cet appareil, dont nous donnons le schéma (*fig.* 64) et la photographie (*fig.* 65), se compose d'un cylindre fileté V, couplé directement à l'extrémité de l'axe du cylindre enregistreur, c'est-à-dire tournant rigoureusement à la même vitesse que lui. Un culbuteur mobile C est basculé au moment de l'enregistrement, et vient par pivotement autour de son axe, au contact de la vis V, qui l'entraîne alors dans un mouvement de translation horizontal. Dans ce mouvement, l'extrémité du culbuteur vient frotter contre une lame élastique L et le contact électrique se trouve établi entre elle et la masse. Arrivé à l'extrémité du cylindre fileté, il tombe, se sépare de la lame et le courant se trouve à nouveau coupé. Il est facile de concevoir que la manœuvre de la tige filetée *v* change la position de la lame de contact et permet ainsi de régler la durée de l'éclairement à une valeur quelconque, comprise entre les limites de zéro à deux tours et demi.

Ajoutons que cet appareil est particulièrement précieux dans le cas des enregistrements rapides. Il fonctionne encore très bien à des vitesses de 25 à 30 tours par seconde. Mais ces vitesses ne correspondent plus à une luminosité suffisante pour impressionner la plaque, car la vitesse de rotation augmentant, le point lumineux se déplace trop rapidement sur la couche sensible.

Avec l'ensemble de ces dispositifs, nous avons obtenu des diagrammes, tels que ceux des figures 66 et 67, d'où nous allons déduire le module de torsion de différents échantillons.

b. Théorie de la méthode.

1° Équation et période du mouvement.

Rappelons rapidement la théorie classique, en indiquant pour quelles raisons elle est applicable dans le cas présent :

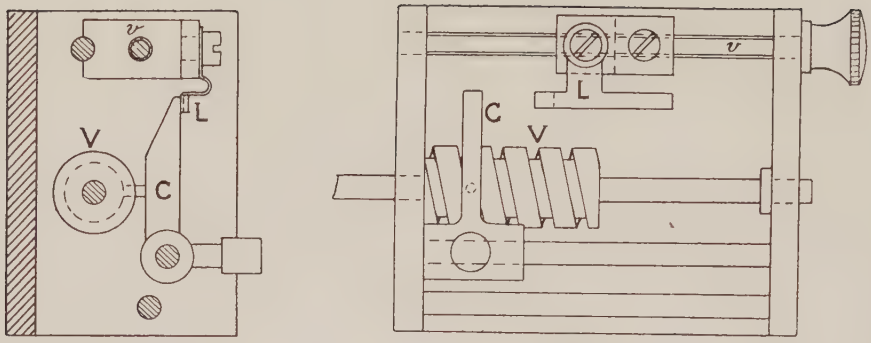


Fig. 64.

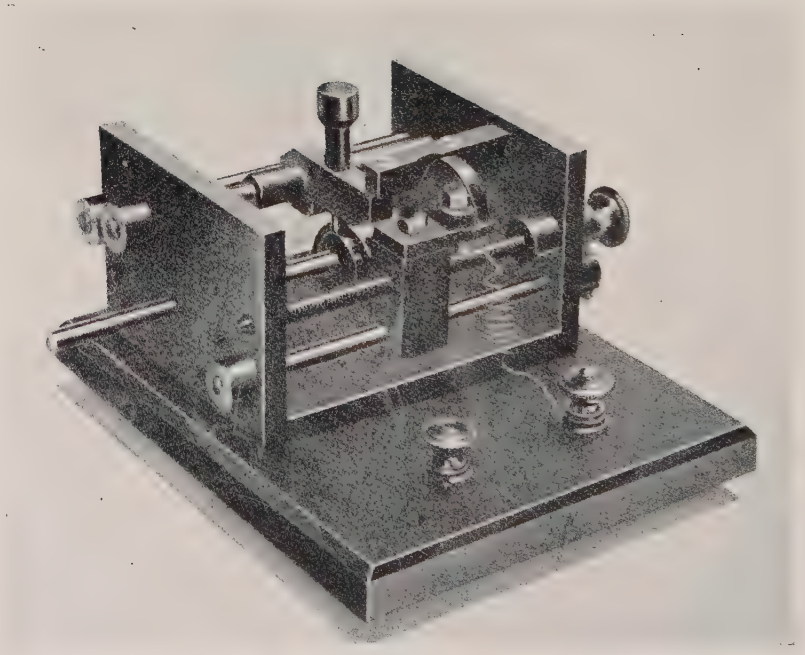


Fig. 65.

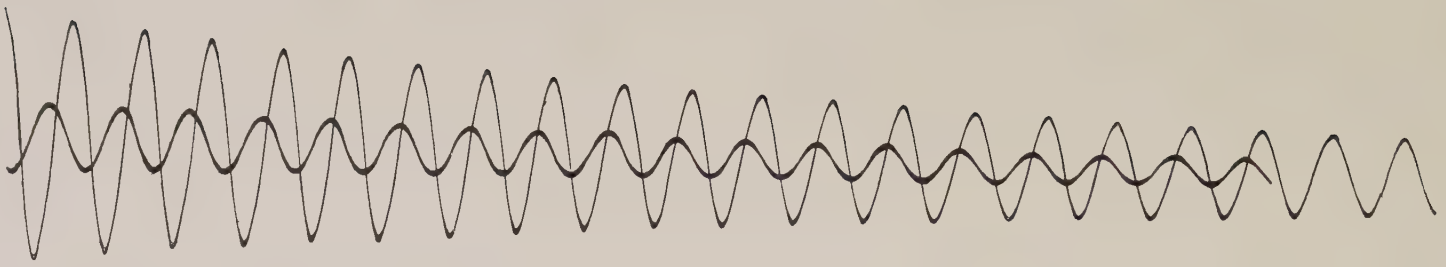


Fig. 66. — Courbe des oscillations de torsion, obtenue avec une éprouvette de chêne, les masses de réglage étant à 6^{cm} du centre.

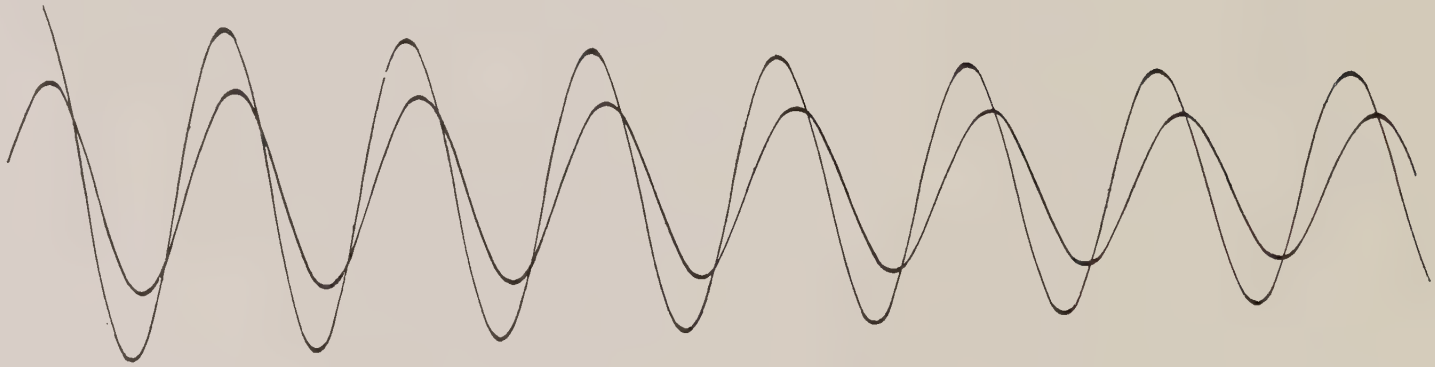


Fig. 67. — Courbe des oscillations de torsion, obtenue avec une éprouvette de chêne, les masses de réglage étant à 23^{cm} du centre.

Ayant fait tourner l'équipage mobile d'un angle α par rapport à l'équipage fixe, l'angle de torsion de l'éprouvette sera, par unité de longueur,

$$\theta = \frac{\alpha}{l},$$

l étant sa longueur.

Le moment d'inertie polaire d'une éprouvette cylindrique, pris par rapport à son axe a, nous le savons, pour valeur

$$J = \frac{\pi d^4}{32}.$$

Soit alors $\mathfrak{M}$ le couple exercé (égal au produit $F \times d$ de la force par la longueur du bras de levier). Il est proportionnel à l'angle dont on tord le fil

$$\mathfrak{M} = K\alpha.$$

La réaction moléculaire de torsion qui agit seule quand on abandonne le système à lui-même est donc $-K\alpha$, d'où l'équation du mouvement

$$I\frac{d^2\alpha}{dt^2} = -K\alpha,$$

avec $K = \frac{G}{l}J$, et I étant le moment d'inertie du système pendulaire par rapport à l'axe de l'éprouvette.

Le mouvement est harmonique et de période

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{K}}.$$

Les oscillations doivent être isochrones. Les courbes enregistrées nous montrent qu'il en est très sensiblement ainsi. Un examen approfondi de ces courbes montre, en effet, sur certaines d'entre elles, un isochronisme absolu. Sur d'autres, comme celles que nous reproduisons, on observe une légère augmentation de la période lorsque l'amplitude décroît. Cette variation très faible, de l'ordre du 1/100e de la période au maximum par oscillation complète, semblerait indiquer une diminution du module, lorsque l'angle de torsion décroît, ce qui est contraire aux résultats des essais statiques, que nous venons d'exposer (et qui concordent d'ailleurs avec ceux trouvés par les autres expérimentateurs). Comme cette différence ne paraît pas provenir d'erreurs expérimentales (la variation se déduit, en effet, du chevauchement de deux parties d'une même courbe), la seule explication possible nous paraît être que, au moins pour certains échantillons de bois, le frottement interne augmente légèrement lorsque les déformations diminuent d'amplitude.

Quoi qu'il en soit, cette variation étant toujours inférieure au 1/100e, et de l'ordre du 1/200e, nous pouvons admettre que la théorie générale s'applique et que, par conséquent, le module de torsion G est donné par la relation

$$G = \frac{32l}{\pi d^4}\,\frac{4\pi^2 I}{T^2}.$$

2° Détermination expérimentale du moment d'inertie du pendule de torsion.

La détermination de G d'après la formule précédente suppose la connaissance du moment d'inertie I du pendule. Malgré la forme simple de l'équipage, le calcul direct en est difficile. Il est plus commode de le déduire de deux mesures correspondant à des valeurs différentes de l'inertie, selon une méthode d'ailleurs classique.

Voyons, en particulier, comment calculer le moment d'inertie de l'équipage mobile que nous avons utilisé avec les masses à 6^{cm} du centre (cas de nos expériences servant à la mesure des modules).

Nous pouvons calculer ce moment d'inertie I_1 en utilisant les résultats de deux mesures faites avec les masses respectivement placées à 6 et 23^{cm} du centre (positions limites).

Soient donc :

I_1 le moment d'inertie du pendule avec les masses à une distance d_1 du centre (égale à 6^{cm});

I_2 le moment d'inertie du pendule avec les masses à une distance d_2 du centre (égale à 23^{cm});

T_1 et T_2 les périodes correspondantes du pendule.

I_1 et I_2 sont respectivement égaux à

$$I_1 = I_0 + 2md_1^2 + 2i.$$

$$I_2 = I_0 + 2md_2^2 + 2i,$$

I_0 étant le moment d'inertie du système sans les masses de réglage; i, le moment d'inertie du cylindre de réglage par rapport à un axe vertical passant par son centre de gravité; m, la masse de chacun des deux cylindres de réglage.

On a

$$I_2 = I_1 + 2m(d_2^2 - d_1^2).$$

Comme les deux déterminations se font sans changer d'éprouvette, le couple de torsion restant le même, les vitesses angulaires sont inversement proportionnelles aux moments d'inertie et l'on peut écrire

$$\frac{\omega_2^2}{\omega_1^2} = \frac{I_1}{I_2}.$$

Il est alors facile d'exprimer I_1 en fonction des deux périodes T_1 et T_2 et des autres valeurs connues, il suffit pour cela de remplacer I_2 par sa valeur précédemment calculée, ce qui donne

$$\frac{\omega_2^2}{\omega_1^2} = \frac{I_1}{I_1 + 2m(d_2^2 - d_1^2)},$$

d'où

$$I_1 = \frac{2mT_1^2(d_2^2 - d_1^2)}{T_2^2 - T_1^2}.$$

C'est à partir de cette relation que nous calculons le moment d'inertie I_1 du pendule qui s'introduit dans nos différentes mesures. Donnons, à titre d'exemple, le calcul effectué au moyen de mesures faites sur une éprouvette de chêne de forêt. L'examen des courbes, données par les figures 66 et 67, nous montre que

$$T_1 = 0,1899 \text{ s.}$$

$$T_2 = 0,5064 \text{ s.}$$

Ces valeurs conduisent à

$$I_1 = 393\,000 \text{ unités C. G. S.}$$

D'autres expériences faites, soit avec des éprouvettes de bois, soit avec un fil d'acier, nous ont donné comme valeur moyenne du moment d'inertie de notre pendule

$$I_1 = 394\,000 \text{ unités C. G. S.}$$

C'est cette valeur que nous conserverons et utiliserons dans la suite de nos calculs. Mais il est intéressant de noter, en passant, la remarquable concordance (au 1/400e près) existant entre les résultats fournis par des essais sur le bois et sur le métal. Ceci nous apporte une nouvelle preuve que la théorie élémentaire précédente peut parfaitement s'appliquer au bois, c'est-à-dire que les déformations de torsion sont très sensiblement proportionnelles aux couples exercés.

Connaissant I_1, il suffit d'une seule expérience pour déterminer le module des différents échantillons. Soit T_1 la période observée pour l'oscillation du pendule de torsion. Avec $d = 18^{mm}$ et $I_1 = 394\,000$ C.G.S., nous avons

$$G = 1529.10^4 \frac{l}{T_1^2} \text{ dynes/cm}^2$$

ou

$$G = 15,45 \frac{l}{T_1^2} \text{ kg cm}^2.$$

3° Modules de torsion.

Nous avons ainsi trouvé les valeurs de G consignées dans le tableau suivant. Comme dans le cas des résultats obtenus à la torsion statique, nous les avons comparés avec les valeurs trouvées à la flexion. En regard de chaque essence, nous avons donc porté les valeurs des rapports $\frac{Ep}{Gp}$ et $\frac{Es}{Gp}$ entre :

α. Les modules de flexion pendulaire et ceux de torsion obtenus par oscillations du pendule.

β. Les modules de flexion statique et ceux de torsion obtenus par la méthode des oscillations.

Les chiffres du tableau se rapportent aux mêmes éprouvettes que celles déjà utilisées dans la détermination des modules de torsion par la méthode statique.

ESSENCES.	MODULES DE TORSION G_p (en kg/cm²).	RAPPORTS $\frac{E_p}{G_p}$.	RAPPORTS $\frac{E_s}{G_p}$.
Chêne	10 550	14,93	10,16
Peuplier	6 200	13,46	10,48
Frêne (aubier)	9 950	13,31	10,63
Hêtre	9 800	13,18	10,51
Pitchpin	11 100	12,83	9,96
Sapin du Jura	7 800	12,58	9,37
Acajou	6 800	12,66	10,25
Okoumé	7 650	11,97	9,66
Acacia	13 700	11,85	10
Noyer	7 250	11,81	10,04
Charme	10 400	11,11	9,25
Cormier	10 500	10,19	8,72

Nous voyons que, dans l'ensemble de nos essais, les modules trouvés par la méthode utilisant les oscillations d'un pendule de torsion sont compris entre 6000 et 14 000. Ils sont plus grands, sauf pour le noyer, que ceux obtenus par la méthode statique. Dans le tableau suivant, nous mettons en évidence cette différence en donnant, pour chaque éprouvette, le rapport entre les modules de torsion trouvés respectivement par les deux méthodes.

ESSENCES.	RAPPORTS $\frac{G_p}{G_s}$.	ESSENCES.	RAPPORTS $\frac{G_p}{G_s}$.
Chêne	1,463	Sapin du Jura	1,234
Pitchpin	1,324	Acacia	1,211
Cormier	1,290	Hêtre	1,144
Charme	1,278	Peuplier	1,108
Acajou	1,270	Frêne (aubier)	1,088
Okoumé	1,250	Noyer	0,845

De ce qui précède, résulte donc qu'à la torsion comme à la flexion, il se produit dans les essais statiques un certain écoulement plastique, correspondant certainement à un glissement des fibres les unes sur les autres.

Nous remarquerons, d'autre part, que dans nos essais avec le pendule de torsion, le rapport moyen entre le module de flexion et celui de torsion est trouvé égal (pour l'ensemble de nos mesures) à 12,49, valeur analogue à celle trouvée sur les mêmes éprouvettes par les essais statiques.

On voit que la comparaison des modules ne peut se faire utilement qu'entre modules obtenus par des méthodes de même principe, soit statique, soit dynamique.

c. **Essais de torsion à charge moyenne nulle, à l'aide des pendules couplés (méthode de M. Le Rolland).**

Nous venons d'étudier, au cours du précédent paragraphe, la détermination du module au moyen de la méthode classique des oscillations d'un pendule de torsion. Les nombres trouvés, plus élevés que ceux obtenus par la méthode statique, ont été comparés avec les modules de flexion pendulaire. Mais l'inconvénient de cette méthode des oscillations est de nécessiter un enregistrement photographique toujours long et délicat. Il était logique, dans cette étude comparative sur les résultats des différentes méthodes, d'appliquer une nouvelle technique plus simple, et de même principe que celle que nous avons utilisée pour l'étude de l'élasticité de flexion : la méthode des pendules couplés (méthode générale proposée par M. Le Rolland).

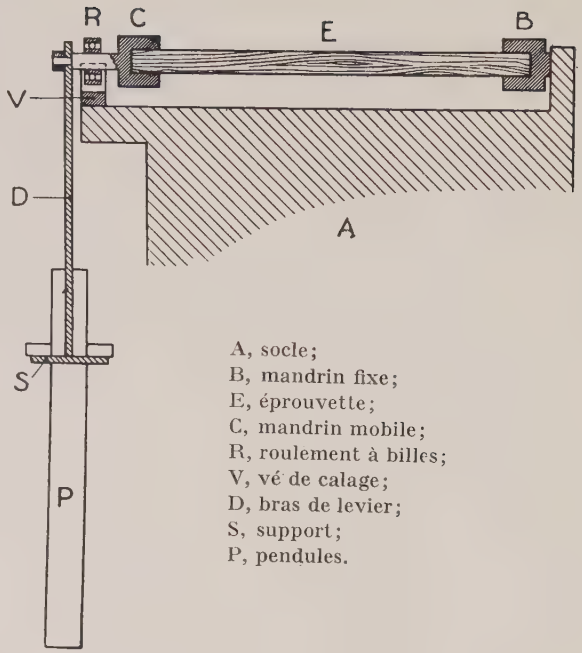
a. Principe de la méthode et dispositif expérimental.

L'éprouvette, dont on veut mesurer le module, est soumise à un couple alternatif de très faible amplitude, dû aux oscillations d'un système de deux pendules reposant à l'extrémité d'un bras fixé à l'éprouvette (*fig.* 69). Supposons primitivement les deux pendules au repos, le système étant en équilibre. Si nous lançons un des pendules, son oscillation crée un effort d'inertie sur le support; celui-ci étant suspendu à l'éprouvette par l'intermédiaire d'un bras de levier, un couple est exercé sur son extrémité et tend à la faire tourner. Le deuxième pendule reçoit donc une légère impulsion. Les actions du premier pendule venant s'ajouter à chaque oscillation, il y aura passage de l'énergie d'un pendule à l'autre et l'on observera le phénomène des battements. De la durée de ceux-ci, il sera facile de déduire la rigidité, donc le module de torsion de l'éprouvette.

Pratiquement, nous avons réalisé le dispositif de mesure de la façon suivante (*fig.* 68 et 69). L'éprouvette est encastrée horizontalement à une de ses extrémités dans un mandrin fixe B, lui-même solidaire du socle A. L'autre extrémité de l'éprouvette est serrée dans un mandrin mobile C, qui peut tourner très librement par rapport à un « vé » de calage V, servant de support, dont il est séparé par un roulement à billes R. Ce dispositif permet d'éviter la flexion qui serait due à la charge du support et des pendules. Ce support S des pendules est fixé à la tête oscillante par l'intermédiaire d'une barre d'acier D, ayant un grand moment d'inertie transversal, afin que l'influence de sa flexion propre soit négligeable. Les deux pendules de gravité sont simplement posés sur le support, les couteaux reposant sur des plans de verre, ce qui diminue le frottement. Les mandrins, à serrage par cônes, étaient ceux déjà utilisés dans notre dispositif de flexion. Enfin, pour plus de commodité et pour éviter les oscillations parasites, nous avons prévu un dispositif de lancement de pendule.

b. Théorie de la méthode.

Considérons (*fig.* 70) une éprouvette encastrée à une extrémité et soumise à l'autre à un couple de torsion U, dû à une force X s'exerçant à l'extrémité



A, socle;
B, mandrin fixe;
E, éprouvette;
C, mandrin mobile;
R, roulement à billes;
V, vé de calage;
D, bras de levier;
S, support;
P, pendules.

Fig. 68.

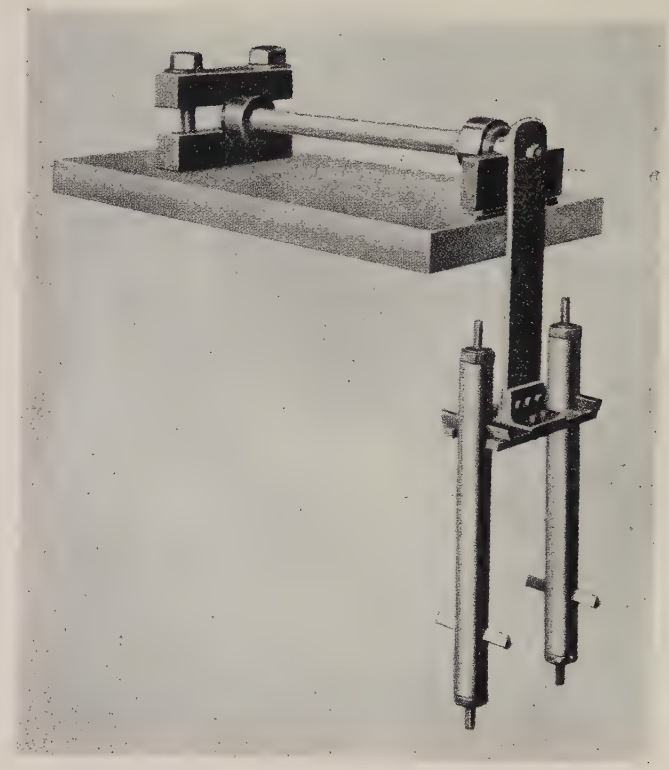


Fig. 69.

Dispositif de torsion utilisant la méthode des pendules couplés.

d'un bras de levier λ et, par suite, tel que

$$U = N\lambda.$$

La force due à l'action des pendules crée, à l'instant t, un petit déplacement a du support. Le rapport $\frac{N}{a}$ définit la rigidité élastique K du système, au point où agissent les pendules, c'est-à-dire à l'extrémité du levier

$$K = \frac{N}{a}.$$

Dans son étude générale de la méthode (1), M. Le Rolland a montré que la rigidité K était donnée, en fonction des caractéristiques des pendules et de la période τ des battements par l'expression

$$K = \frac{4\pi^2 M}{T^2}\,\frac{Mh^2}{I}\tau.$$

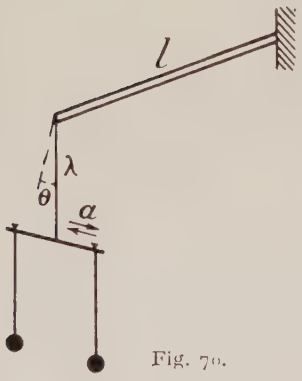


Fig. 70.

dans laquelle M, h, I sont les caractéristiques mécaniques communes des deux pendules (masse, distance du centre de gravité à l'axe, moment d'inertie), T leur période et τ la durée des battements.

La rigidité est ainsi proportionnelle à cette durée τ des battements

$$K = B\tau.$$

Des deux premières relations, nous tirons

$$K = \frac{U}{\lambda a}.$$

Mais U peut s'exprimer par rapport au module de torsion G de l'éprouvette, à sa longueur l, à son moment d'inertie J et à l'angle θ dont est tordue son extrémité. La théorie élémentaire de la torsion donne, en effet,

$$U = \frac{GJ}{l}\theta,$$

θ étant lui-même égal à $\frac{a}{\lambda}$, il vient

$$K = \frac{GJ}{l\lambda^2} = B\tau.$$

donc,

$$G = \frac{l\lambda^2}{J}B\tau.$$

(1) *Loc. cit.* p. 1.

Dans nos essais, les valeurs numériques étaient les suivantes :

$$M = 1006^{g},7, \qquad T = 0^{s},780,$$
$$h = 6^{cm},98, \qquad \frac{Mh^2}{I} = 0^{s},4615,$$

ce qui conduit à une valeur de B égale à 38 640 C.G.S.

Il suffit donc de mesurer τ pour déduire, au moyen de la formule ci-dessus, les valeurs de G correspondant à chacune des éprouvettes.

c. Résultats obtenus.

Nous avons été un peu gênés, dans l'observation des résultats, par le frottement interne important que présente le bois à la torsion. Dans ce cas, en effet, l'énergie fournie par le pendule moteur sert non seulement à lancer le pendule récepteur, mais aussi à vaincre le frottement interne. Cette deuxième partie de l'énergie se trouve perdue, et il n'y a pas restitution complète d'énergie entre les pendules. Dans ces conditions, les arrêts sont remplacés par des minima d'amplitude. Ceux-ci sont très facilement observables lors des premiers battements, mais ils deviennent de moins en moins nets, si bien qu'au bout d'un certain temps, il devient très difficile de les observer. Pour plus de sûreté, nous avons utilisé une lunette pour l'observation de ces battements et nous avons répété plusieurs fois chacune des expériences. Les chiffres que nous donnons résultent donc de la moyenne d'un certain nombre de mesures, qui, d'ailleurs, ne différaient guère l'une de l'autre que de 2 à 3 dixièmes de seconde au maximum. Toutefois, il ne fallait pas négliger cette difficulté dans des essais où la période des battements est relativement courte (comprise entre 8 et 40 sec). Dans les cas les plus défavorables, on aurait pu, en effet, introduire ainsi une erreur relative pouvant atteindre le 1/25e, ce qui est important.

1° Modules de torsion. — Nous avons noté, dans le tableau suivant, les valeurs du module de torsion obtenues avec les principales essences déjà étudiées à la flexion. Nous avons marqué d'une astérisque les éprouvettes qui ont été déjà soumises aux essais de torsion par la méthode des oscillations. Ainsi, nous pouvons comparer les résultats fournis par les deux méthodes.

ESSENCES.	MODULES G (en kg/cm²).	ESSENCES.	MODULES G (en kg/cm²).
Acacia*	13 860	Okoumé*	8 700
Chêne	11 590	Châtaignier	8 620
Pitchpin*	11 060	Peuplier	8 170
Frêne	10 670	Teck	8 010
Charme*	10 540	Platane	7 980
Cormier*	10 300	Sapin du Jura*	7 680
Hêtre	10 300	Spruce	7 100
Noyer	9 710	Acajou*	6 870
Orme	9 030		

Des valeurs ci-dessus et du tableau de la page 79, nous pouvons déduire les remarques suivantes :

α. La comparaison entre les valeurs trouvées pour les modules, avec les essences marquées d'une astérisque, et celles qui ont été obtenues avec les mêmes éprouvettes dans l'essai utilisant les oscillations de torsion, nous montre, qu'avec une précision de l'ordre de l'erreur expérimentale (1/100e à 2/100e), les résultats fournis par les deux méthodes sont les mêmes. Il y a donc bien analogie entre les divers essais opérant à charge moyenne nulle. Ainsi que nous l'avons déjà dit, il ne faudra donc comparer, en vue d'obtenir des rapports certains entre les différents modules, que des résultats obtenus par des méthodes de principes analogues.

Enfin, à la torsion comme à la flexion, la méthode pendulaire présente le gros avantage de supprimer l'influence de l'écoulement et de donner ainsi un module « vrai », dépendant uniquement des forces élastiques qui s'exercent dans l'échantillon soumis à une déformation.

β. On voit aussi que deux échantillons différents d'une même essence peuvent présenter des différences importantes, dans les valeurs de leur module de torsion. Ces différences ne doivent d'ailleurs pas nous surprendre : elles sont fréquentes, quelles que soient les espèces, et quel que soit le mode d'essai utilisé. Mais nous ne faisons ici que constater un fait général, bien connu de tous les auteurs ayant étudié le bois.

2° Influence, sur la valeur de G, de l'orientation des fibres par rapport a l'axe et comparaison avec les modules de flexion. — La rigidité de torsion d'une éprouvette dépend évidemment de la direction générale des fibres par rapport à son axe. Il était intéressant de mesurer les modules sur des échantillons, taillés de façon que l'axe de l'éprouvette soit, par exemple, perpendiculaire à la direction des fibres.

Dans le tableau ci-contre, après avoir donné les résultats trouvés dans ces conditions, nous indiquons trois séries de rapports utilisant chacune les deux valeurs trouvées à la flexion dans les sens A et B. Ce sont les rapports :

1° Entre les modules de flexion E sur éprouvettes à fibres parallèles à l'axe et ceux de flexion E′ sur éprouvettes dont les fibres sont perpendiculaires à cet axe.

2° Entre les modules de flexion E sur éprouvettes à fibres parallèles à l'axe et ceux de torsion G sur ces mêmes éprouvettes.

3° Entre les modules de flexion E sur éprouvettes à fibres parallèles à l'axe et ceux de torsion G′ sur éprouvettes dont les fibres sont perpendiculaires à cet axe.

La diversité des nombres obtenus pour ces rapports selon les essences, met clairement en évidence la très grande hétérogénéité du bois. Il faudrait donc bien se garder de déduire les valeurs des coefficients de Poisson σ, de la formule

Tableau comparatif des modules de flexion et de torsion.

N° des éprouvettes.	CARACTÉRISTIQUES.	ESSENCES.	MODULES DE FLEXION (en kg/cm²).		MODULES de TORSION.	RAPPORTS $\frac{E}{E'}$.		RAPPORTS $\frac{E}{G}$.		RAPPORTS $\frac{E}{G'}$.	
			SENS A.	SENS B.							
515	Fibres parallèles à l'axe	Frêne.....	178 800	169 700	10 670	12,5	12,3	16,8	15,8		
516	Fibres perpendiculaires à l'axe	Frêne.....	14 360	13 810	5 890					30,4	28,8
513	Fibres parallèles à l'axe	Spruce.....	126 600	122 860	7 100	12,6	11,8	17,8	17,3		
514	Fibres perpendiculaires à l'axe	Spruce.....	1 000	1 040	2 510					50,4	48,9
501	Fibres parallèles à l'axe	Chêne	124 500	122 900	11 590	9,5	9,9	10,7	10,6		
510	Fibres perpendiculaires à l'axe	Chêne	13 100	12 300	7 230					17,2	17
519	Fibres parallèles à l'axe	Hêtre.....	116 000	112 800	10 300	11,5	11,3	11,3	11		
520	Fibres perpendiculaires à l'axe	Hêtre.....	10 100	10 000	6 740					17,2	16,7
511	Fibres parallèles à l'axe	Peuplier	93 000	89 800	8 170	38,8	42,7	11,4	11		
512	Fibres perpendiculaires à l'axe	Peuplier	2 400	2 100	2 320					40,1	38,7
517	Fibres parallèles à l'axe	Sapin du Jura.....	73 800	74 300	7 700	8,5	13,3	9,6	9,7		
518	Fibres perpendiculaires à l'axe	Sapin du Jura.....	8 700	5 600	2 360					31,3	31,5

classique, valable seulement dans le cas des corps homogènes et isotropes,

$$E \simeq \frac{G}{2(1+\sigma)}.$$

Nous arriverions ainsi à des valeurs de σ, incompatibles avec celles que l'on pourrait obtenir directement par la mesure de la contraction latérale accompagnant l'allongement d'une éprouvette. Pour un corps fibreux, comme le bois, il faut évidemment tenir compte de la variation des propriétés élastiques avec la direction (1).

---

(1) *Voir*, à ce sujet, J. Campredon, *Contribution à l'étude des propriétés élastiques du bois* (*op. cit.*, p. 46).

CHAPITRE IV.

COMPARAISON ENTRE LES DIFFÉRENTS MODULES D'ÉLASTICITÉ DU BOIS.

A. — RAPPEL DES PRINCIPAUX RÉSULTATS DE NOTRE ÉTUDE.

Nous avons vu, dans les chapitres précédents, les différences importantes trouvées pour les valeurs des modules de flexion et de torsion, selon que les mesures étaient effectuées par une méthode opérant à charge moyenne nulle, ou par une méthode appliquant à l'éprouvette une charge continue. Nous avons attribué cette différence (en moyenne 1/10e de la valeur des modules trouvés) au phénomène d'écoulement qui se produit toujours lorsqu'on charge en flexion ou en torsion une éprouvette de bois, écoulement dû certainement à un glissement progressif des fibres les unes par rapport aux autres.

Avec les sollicitations de traction et de compression, au contraire, l'expérience montre qu'aucun écoulement ne se produit; les fibres ne peuvent, en effet, glisser les unes par rapport aux autres. On voit combien le bois diffère des corps plastiques, qui, même en traction, s'écoulent sous charge constante.

Il paraît donc tout indiqué de comparer aux modules de traction et de compression, le module de flexion obtenu par la méthode pendulaire et non le module « statique ». Nous avons vu, en effet, que dans l'essai aux pendules, où la charge change alternativement de sens, l'écoulement n'a pas le temps de se produire de manière appréciable. D'autre part, les modules de compression ont été trouvés sensiblement égaux à ceux de traction. Si nous admettons la théorie élémentaire de la flexion, le module de flexion, qui doit être une moyenne entre les deux modules de traction et de compression, doit leur être trouvé égal. C'est bien ce que vérifie le tableau ci-contre.

Pour un certain nombre d'échantillons, nous donnons, dans les colonnes 2 à 5, les valeurs obtenues pour les différents modules. Dans la colonne 6, le rapport existant entre le module de traction (T) et celui de compression C. Dans les quatre dernières, enfin, nous indiquons les valeurs des rapports entre les deux modules de flexion trouvés respectivement dans les deux sens d'essais (sens radial B et tangentiel A) définis précédemment, et les modules correspondants de traction et de compression.

TABLEAU DONNANT LES VALEURS COMPARATIVES DES DIFFÉRENTS MODULES (FLEXION PENDULAIRE, TRACTION ET COMPRESSION).

ESSENCES.	MODULES DE FLEXION E (en kg/cm²).		MODULES		RAPPORTS $\frac{T}{C}$.	RAPPORTS		RAPPORTS	
	SENS A.	SENS B.	DE COMPRESSION C.	DE TRACTION T.		$\frac{E_{max}}{T}$.	$\frac{E_{min}}{T}$.	$\frac{E_{max}}{C}$.	$\frac{E_{min}}{C}$.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Noyer	91 600	90 300	92 500	90 200	0,973	1,026	1,001	0,991	0,976
Peuplier	98 600	102 200	104 800	102 700	0,979	0,995	0,960	0,975	0,941
Pitchpin	113 300	114 700	112 900	115 000	1,019	0,997	0,985	1,016	1,004
Sapin du Jura	98 500	97 400	100 200	99 100	0,990	0,994	0,982	0,983	0,972
Sapin du Nord	134 200	133 200	131 200	134 000	1,022	1,001	0,994	1,023	1,015
Sapin de Russie	122 400	119 500	122 800	119 200	0,971	1,027	1,003	0,997	0,973
Chêne	125 700	122 100	129 800	132 700	1,030	0,947	0,921	0,968	0,941
Frêne (cœur)	115 200	113 000	117 000	113 000	0,966	1,019	1,000	0,984	0,966
Frêne (aubier)	134 200	128 100	137 600	134 000	0,974	1,001	0,956	0,975	0,931
Pin maritime	121 000	126 100	124 200	127 500	0,975	0,990	0,949	1,016	0,974
Spruce	130 000	132 000	135 100	132 500	0,980	0,996	0,981	0,977	0,962
Teck	70 900	73 600	70 100	68 500	0,977	1,075	1,035	1,050	1,012
Platane	81 800	80 700	83 700	80 300	0,961	1,020	1,004	0,978	0,964
Châtaignier	85 000	82 300	75 100	77 500	1,032	1,097	1,063	1,131	1,096
Orme	120 100	111 800	119 100	122 100	1,025	0,991	0,966	1,008	0,938
Hêtre	132 000	130 500	133 600	131 200	0,982	1,006	0,995	0,988	0,976
Valeurs moyennes des différents rapports					0,991	1,011	0,987	1,004	0,977

B. — PRÉCISION DES ESSAIS.

Avant de tirer les conclusions qui se dégagent des résultats fournis par ce tableau, il n'est pas inutile de rappeler quelle est la précision obtenue dans nos différents essais.

a. A la flexion.

Nous avons vu que la formule employée est

$$E = \frac{128\pi}{3} \frac{M l^3}{d^4 T^2} \tau.$$

Il est facile de mesurer la longueur de l'éprouvette à $2/10^e$ de millimètre près, et son diamètre à $1/10^e$ de millimètre. Ainsi, l'erreur relative sur la longueur est de $\frac{0,2}{245} \simeq \frac{8}{10000}$. Sur le diamètre, elle est de $\frac{0,1}{18} \simeq \frac{1}{200}$. La masse des pendules est mesurée avec toute précision voulue; on n'introduit donc par elle aucune erreur. Leur période est obtenue à $1/1000^e$ près; quant à l'erreur sur la période des battements, elle ne dépasse pas une demi-seconde sur 300 ou 400, ce qui correspond à une erreur relative inférieure au $1/500^e$. Faisant la somme des ereurs relatives introduites dans les mesures de flexion, nous trouvons que

$$\frac{\Delta E}{E} < \frac{3}{100}.$$

Comme on le voit, la précision est assez faible.

La principale cause d'erreur est due, non à la méthode de mesure utilisée, mais à la difficulté d'obtenir le diamètre d'un cylindre de bois avec une précision supérieure au $1/10^e$ de millimètre. On ne peut, en effet, atteindre qu'une dimension moyenne, car :

1° Les différences de dureté entre les diverses couches font que l'outil attaque plus ou moins le bois et que l'éprouvette n'est pas, de ce fait, rigoureusement cylindrique;

2° L'échauffement, dû au tournage, provoque une légère déshydratation du bois lors de la confection de l'éprouvette. La matière, en se remettant ultérieurement en équilibre avec l'air ambiant, se dilate de façon inégale dans le sens radial et dans le sens tangentiel. La section finale n'est donc plus un cercle, mais une ellipse dont les deux diamètres sont très légèrement supérieurs à celui du cercle primitif. Ces deux causes d'erreurs (mécanique et hygrométrique) ne peuvent être annulées complètement et c'est pourquoi, malgré le soin que nous avons apporté dans la confection de nos éprouvettes, nous croyons prudent d'admettre une erreur absolue probable du $1/10^e$ de millimètre sur le diamètre. Nous voyons l'intérêt qu'il y a à opérer sur de grosses éprouvettes pour diminuer l'erreur relative.

b. **A la traction et à la compression.**

Nous utilisons la relation

$$E = \frac{l}{\Delta l}\frac{P}{S}.$$

L'allongement relatif est apprécié sans difficulté au 1/1000e près, sur une base de 100mm, grâce à la précision de l'appareil Martens. Par contre, la mesure de la surface de la section (dépendant de celle du diamètre, qui comporte une erreur possible de 1/10e de millimètre) introduit une erreur de 2 à 3/100e dans le cas de nos éprouvettes (7mm de diamètre). Enfin, la mesure de l'effort, précise sur notre machine de compression où la charge est constituée par des poids, comporte, dans les essais avec la machine Trayvouz (essais statiques de traction), une erreur pouvant atteindre facilement le 1/100e pour de faibles contraintes. Ainsi, nous obtenons comme erreur relative

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{4}{100}.$$

Bien entendu, ces erreurs sont des maxima.

Afin de pouvoir conclure dans les meilleures conditions possibles, chacun des chiffres de notre tableau a été obtenu en faisant la moyenne d'un grand nombre de mesures, dont l'accord était satisfaisant et de l'ordre de ce que nous permet d'attendre l'étude précédente des erreurs.

C. — CONCLUSIONS.

1° Le rapport $\frac{T}{C}$ moyen a pour valeur 0,991. On peut donc le considérer comme égal à 1 à environ 1/100e près.

2° Les rapports moyens entre les valeurs maxima trouvées, pour les modules, à la flexion et celles des modules de traction et compression sont respectivement de 1,011 et 1,004, soit à 1/100e près égaux à 1. Une telle concordance, obtenue avec un grand nombre d'essais ne peut être l'effet du hasard. On peut donc affirmer, qu'à condition d'opérer de manière à éliminer l'influence de l'écoulement de la matière, *les différents modules : de traction, de compression et de flexion sont égaux.* Ce résultat est valable pour des contraintes restant dans la limite où il y a proportionnalité entre les déformations et l'effort de compression. Nous avons vu, en effet, qu'à partir de certaines charges relativement faibles, le module de compression diminue, tandis que celui de traction reste constant. Ajoutons, enfin, que la conclusion précédente légitime nos formules de flexion dans l'application de la méthode des pendules couplés. Nous avons, en effet, admis l'hypothèse que la fibre neutre était située au centre de l'éprouvette, pour appliquer la formule classique de la flexion plane.

CHAPITRE V.

QUELQUES APPLICATIONS DE LA MÉTHODE PENDULAIRE A L'ÉTUDE DE LA VARIATION DES MODULES EN FONCTION DE DIVERS FACTEURS.

La réalisation pratique de la méthode de mesure des modules par pendules couplés, que nous avons faite, permet, non seulement de comparer au point de vue de l'élasticité les valeurs relatives de différents échantillons, à leur état naturel ou ayant subi différents traitements, mais aussi d'étudier la variation de rigidité pendant l'action même de toute cause susceptible de modifier les propriétés élastiques. Dans ce chapitre, nous donnons quelques exemples d'application de la méthode à l'étude de divers facteurs.

A. — VARIATION DU MODULE EN FONCTION DE L'ESPACE ENTRE LES COUCHES ANNUELLES ET EN FONCTION DE LA DENSITÉ.

Ayant à notre disposition un certain nombre d'échantillons de « spruce » de diverses qualités, nous avons cherché si, pour cette essence, les deux facteurs, densité et espace entre les couches annuelles, influent d'une manière bien définie sur la valeur du module d'élasticité de flexion (1). Nous avons donc mesuré la rigidité d'un certain nombre de nos échantillons, choisis parmi les plus caractéristiques, ce qui nous a permis de construire les courbes des figures 71 et 72, qui montrent comment varie le module en fonction des deux facteurs. Comme la densité et l'espacement des couches varient ensemble, mais dans un rapport mal défini, nous ne nous sommes occupé, pour tracer les courbes, que d'un seul des facteurs, la densité, ou l'espacement des couches.

On peut conclure, de l'examen des tracés, qu'il existe, pour une même essence, des relations assez grossières entre le module et les deux caractéristiques étudiées. Mais les points ayant comme coordonnées : d'une part, le module et, d'autre part, l'espace entre les couches annuelles (ou la densité), se dispersent beaucoup autour des courbes moyennes que l'on peut tracer. Connaissant la nature de l'essence d'un échantillon de bois, on ne saurait donc, à l'aide de

(1) Les mesures destinées à montrer cette influence ont été effectuées sur des éprouvettes où la direction générale des fibres et celle de l'axe sont confondues (voir *fig.* 1, p. 9).

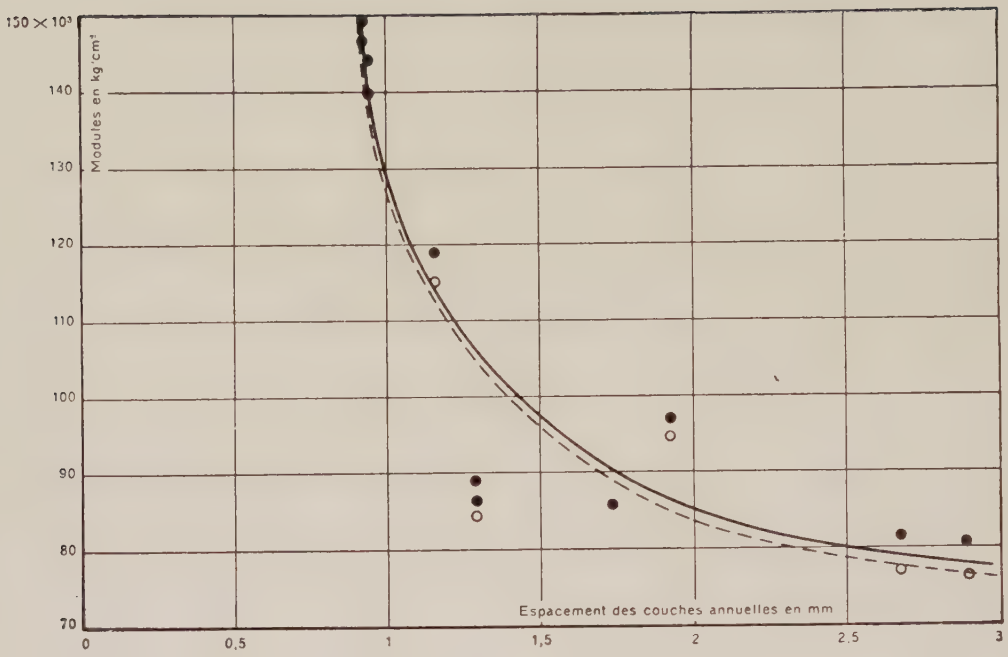


Fig. 71. — Courbes donnant la variation du module d'élasticité du spruce en fonction de l'écartement des couches annuelles. Humidité 15 pour 100.

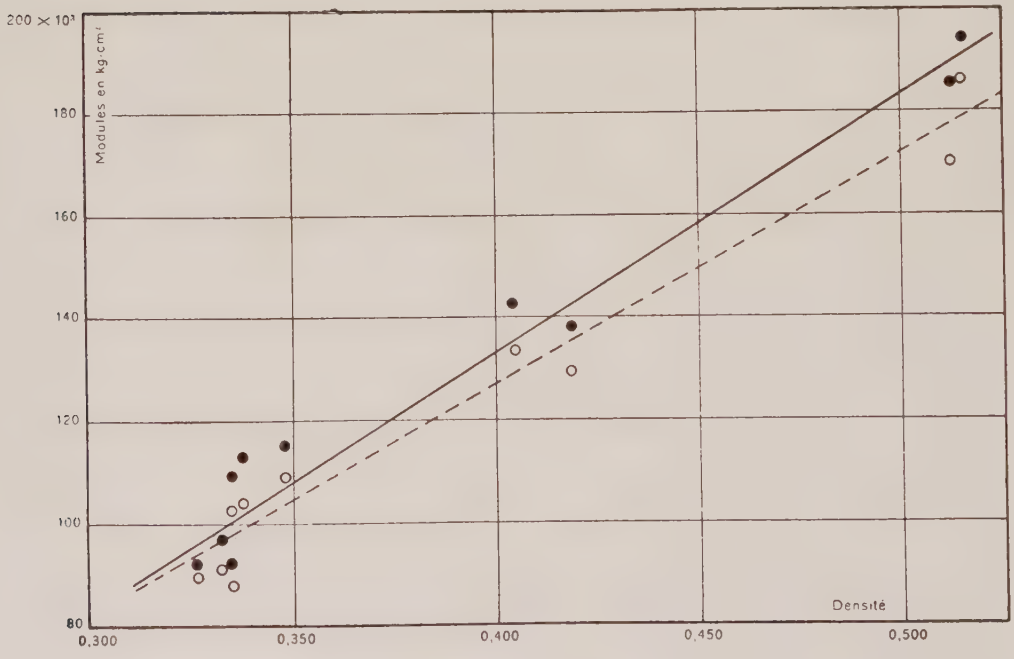


Fig. 72. — Courbes donnant la variation du module d'élasticité du spruce en fonction de la densité. Humidité 0 pour 100.

ces courbes, déduire avec précision la valeur de son module, de la seule mesure d'une des deux caractéristiques que nous étudions actuellement. La valeur du module ainsi définie pourrait comporter une erreur de 1/10e si l'on utilisait la densité, et jusqu'à 2/10e si l'on se servait de l'écartement des couches annuelles.

D'autre part, il peut arriver, mais toutefois dans d'assez faibles limites, que certains échantillons ne suivent pas les lois générales. C'est ainsi que, pour certaines éprouvettes, de même essence et de densité sensiblement identique, nous avons trouvé que les valeurs des modules étaient proportionnelles à l'espace entre les couches annuelles, ce qui est exactement l'inverse du phénomène général. Il n'est pas rare également de constater que, même dans des bois de même provenance, l'échantillon le plus dense est celui qui a les couches annuelles les plus espacées.

Il ne faut donc pas chercher à donner des lois générales précises, tendant à relier les diverses caractéristiques considérées. Tout au plus, peut-on dire que pour une essence donnée, le module d'élasticité est sensiblement proportionnel à la densité. Ce résultat est d'ailleurs en concordance avec ceux que les expérimentateurs précédents ont obtenu par diverses méthodes (1).

B. — INFLUENCE SUR LE BOIS D'UN SÉJOUR PROLONGÉ (PLUSIEURS ANNÉES) DANS L'EAU.

Les quelques remarques qui suivent ont été faites sur un échantillon de chêne ayant séjourné une cinquantaine d'années dans l'eau (ce bois, qui avait servi à faire des constructions immergées, nous a été fourni par le Service des Ponts et Chaussées de Rennes).

a. Remarques sur le travail de ce bois.

Particulièrement difficile à travailler, il oppose une résistance importante à l'avancement des outils tranchants. Au travail sur le tour, ses fibres se décollent rapidement, ce qui ne permet pas d'obtenir une surface lisse. Par contre, le papier de verre ne l'attaque que très peu, et l'on peut obtenir par cette usure lente un très beau poli. Il faut, enfin, éviter de travailler ce bois au tour avec de trop fortes passes, car, le travail de l'outil échauffant la surface, l'eau incluse dans les cellules tend à sortir rapidement; et, en raison de la répartition non homogène de l'eau dans la masse, des tensions se produisent, faisant d'autant plus travailler l'échantillon que celui-ci est plus mince.

Par le seul travail mécanique de ce chêne, on reconnaît donc déjà un bois contenant une très forte quantité d'eau d'inclusion.

---

(1) On trouve quelques exemples de courbes, montrant la variation des différents modules d'élasticité en fonction de la densité, dans le remarquable ouvrage du Dr-Ing. F. Kollmann, *Technologie des Holzes* (Julius Springer, Berlin, 1936), et dans les travaux originaux des divers auteurs que nous avons cités plus haut. Mais autour de toutes ces courbes moyennes, les points ayant servi à les tracer accusent une assez large dispersion.

b. **Propriétés de l'échantillon étudié.**

Ce chêne est saturé d'humidité. Il nous a, notamment, été impossible d'augmenter son degré de saturation par un chauffage, même très prolongé dans la vapeur d'eau à 100° (le poids de l'éprouvette est resté constant). La teneur en eau a été trouvée égale à 45,3 pour 100.

Mais si le bois en question est primitivement saturé, il n'en reste pas moins susceptible de subir des variations de teneur en eau. Nous venons de voir, en effet, comment il perdait son humidité par échauffement dû à l'outil. Un chauffage à l'étuve à 110° nous a montré qu'un échantillon de ce vieux chêne perdait son humidité beaucoup plus vite qu'un échantillon de chênes séché à l'air, puis saturé d'eau par la vapeur. Une fois desséché, l'échantillon possédait la densité 0,595, inférieure à la densité habituelle du chêne, ce qui permet de penser qu'au cours des années, une partie des matières organiques s'est dissoute dans l'eau. Cette modification de la structure se trouve d'ailleurs correspondre à une diminution importante de la qualité de la résistance mécanique. Ajoutons, enfin, qu'ayant perdu son humidité, soit par chauffage, soit par un travail mécanique ayant échauffé le bois, soit par simple séjour dans l'air sec, l'échantillon s'humidifie à nouveau très facilement, s'il se trouve placé dans un milieu humide. Il nous a été facile de vérifier que deux échantillons, l'un du chêne étudié, l'autre de chêne ordinaire, étant transportés brusquement d'un air sec dans un air humide, celui qui s'humidifie le plus vite est l'échantillon prélevé dans le chêne ayant été immergé.

Pour définir l'altération des propriétés élastiques d'un tel bois, donnons simplement le tableau suivant des modules d'élasticité de flexion trouvés par la méthode des pendules couplés, pour deux échantillons, l'un de chêne ordinaire, l'autre de vieux chêne. Pour avoir un terme rationnel de comparaison, nous donnons également pour les deux échantillons les valeurs du module correspondant à une teneur en eau nulle. Rappelons que le sens A correspond à un plan de flexion tangent aux couches annuelles et le sens B à un plan d'essai radial.

ÉPROUVETTE DE VIEUX CHÊNE.			ÉPROUVETTE DE CHÊNE NORMAL.		
HUMIDITÉ.	MODULES (en kg/cm²).		HUMIDITÉ.	MODULES (en kg/cm²).	
	Sens A.	Sens B.		Sens A.	Sens B.
38,9	81 500	86 500	20,3	152 200	150 800
0	90 800	88 300	0	159 000	152 000

Nous voyons très nettement que l'échantillon de bois, soumis à l'action prolongée de l'eau, possède des propriétés élastiques nettement inférieures à celles d'un échantillon de bonne qualité prélevé dans un bois de même essence.

En résumé, le séjour du chêne dans l'eau a diminué sa résistance élastique

et l'a rendu très sensible aux variations hygroscopiques extérieures (1). On ne pourrait donc l'utiliser que dans des constructions immergées, et il faudrait le proscrire absolument dans la construction à l'air libre.

c. **Remarque.**

Sans doute, notre comparaison entre les deux échantillons de chêne n'est-elle pas rigoureuse; nous ne sommes, en effet, nullement certain que les deux bois comparés aient présenté initialement, dans les mêmes conditions, les mêmes propriétés. Mais on ne peut attribuer les différences très importantes trouvées, à la seule différence des qualités d'origine des deux échantillons; les conclusions précédentes, très nettes, ne peuvent donc être infirmées par l'hypothèse de deux bois de nature et d'origine différentes.

C. — INFLUENCE SUR LE MODULE DU BOIS, DE SÉJOURS DANS LA VAPEUR D'EAU A 100°.

Il est particulièrement intéressant de connaître les modifications que peut faire subir au module d'élasticité du bois l'action plus ou moins prolongée de la vapeur d'eau à 100°. On utilise, en effet, couramment, l'action de la vapeur pour courber le bois ou modifier sa forme. Nous avons donc fait quelques expériences, destinées à mesurer la rigidité, pendant l'action même de la vapeur d'eau. Notre dispositif expérimental par pendules couplés se prête particulièrement bien à de tels essais. Il suffit de faire passer un courant de vapeur dans une enceinte entourant l'éprouvette. Un thermomètre, traversant cette enceinte, donne la température (voir *fig.* 18).

a. **Influence de la durée du séjour.**

L'humidité ne traversant pas instantanément les éprouvettes de bois, nous avons étudié ces dernières pendant un certain temps, en mesurant toutes les 15 min les valeurs du module d'élasticité, sans cesser de faire agir la vapeur. Pour nos tiges de 18^{mm} de diamètre, nous avons obtenu des variations du module en fonction du temps, dont quelques-unes sont représentées (*fig.* 73). Nous voyons que le module apparent décroît très rapidement pendant les premières minutes d'exposition à la vapeur. Après 15 min, il tend vers une valeur définie et 30 min après le début de l'opération, cette valeur limite du module du bois, plongé dans la vapeur d'eau à 100°, est pratiquement obtenue. Bien entendu, ce temps n'est valable que pour la forme et les dimensions de nos éprouvettes, la durée de pénétration de l'humidité dépendant de la longueur et des dimensions transversales des échantillons soumis à l'essai. D'autre part, il n'est pas tenu compte des modifications de dimensions transversales dues à l'humidité, celles-ci étant inséparables du phénomène d'humidification et impossibles à mesurer pendant l'intervention même du facteur vapeur d'eau.

(1) Nous avons pu mettre ce fait particulièrement en évidence, au moyen des méthodes d'études électriques, que nous exposons en appendice à cette étude.

L'examen comparatif des diverses courbes reproduites nous montre, pour les différents bois, des vitesses d'humidification sensiblement analogues.

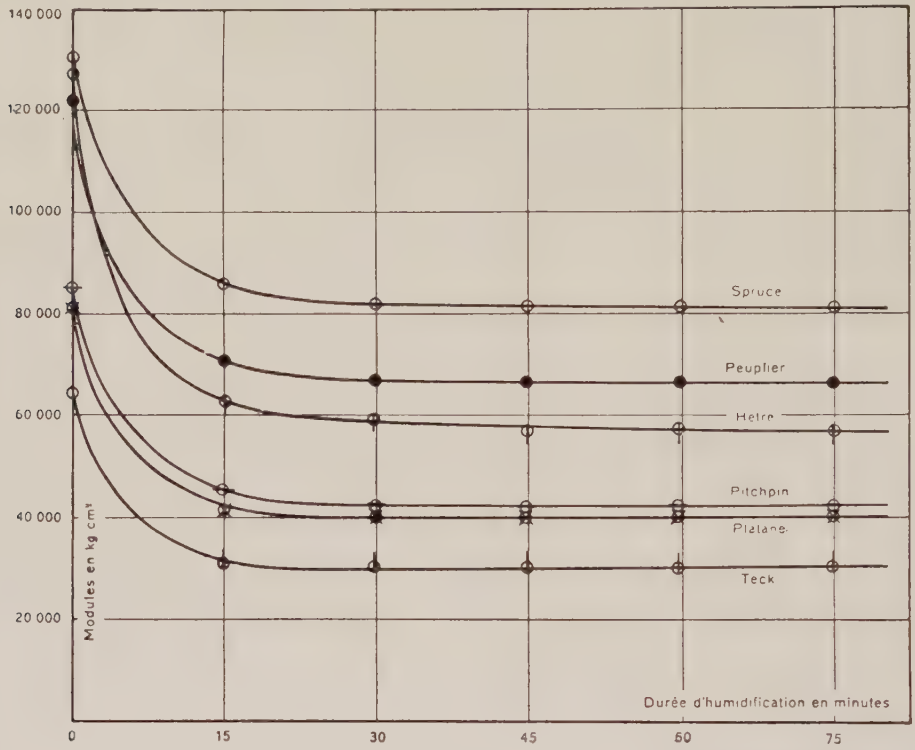


Fig. 73. — Variation du module de flexion en fonction de la durée d'humidification dans la vapeur à 100°.

b. **Diminution relative de module.**

Il est intéressant de déterminer, d'autre part, les diminutions relatives des modules. On les trouvera dans le tableau suivant où nous avons rassemblé, pour quelques essences, les rapports existant entre le module (M_1), pris à la température ambiante, dans les conditions normales (taux d'humidité 14 pour 100), et le module apparent (M_2) du même échantillon, en équilibre dans la vapeur à 100°.

ESSENCES.	M_1 = MODULE dans les conditions normales.	M_2 = MODULE APPARENT dans la vapeur à 100°.	RAPPORT $\frac{M_1}{M_2}$.
Spruce	130 000	80 900	1,606
Pitchpin	85 200	42 100	2,025
Platane	81 300	40 200	2,022
Frêne	153 500	66 600	2,305
Teck	64 600	30 900	2,090
Sapin du Nord	131 800	82 100	1,605
Peuplier	122 200	66 600	1,835
Orme	86 800	35 500	2,445

Ainsi, le module apparent paraît diminuer d'environ la moitié de sa valeur pour la moyenne des essences, cette diminution restant toutefois caractéristique de chaque essence et pouvant varier dans d'assez larges limites de l'une à l'autre. (Dans nos essais, le rapport $\frac{M_1}{M_2}$ varie, comme on le voit, entre 1,5 et 2,5.)

Rappelons qu'il s'agit là de variations des modules mesurés par la méthode pendulaire. La méthode de flexion statique, qui ne permet pas d'éliminer le phénomène d'écoulement dont nous avons parlé plus haut, donnerait ici des résultats certainement faussés par la plasticité du bois, d'autant plus importante que la matière ligneuse est soumise à l'action plus prolongée de la vapeur à température élevée.

D. — VARIATION DE L'ÉLASTICITÉ DU BOIS SOUMIS A L'ACTION DU FROID.

Il arrive très fréquemment que les constructions en bois soient soumises à l'action de températures relativement basses, par exemple, en raison du climat ou de l'altitude. La matière ligneuse, comprenant dans sa structure de l'eau de constitution et de l'eau d'inclusion, une congélation de cette eau semble *a priori* devoir provoquer des variations assez sensibles de l'élasticité. Il est donc intéressant d'étudier l'action du froid sur les modules d'Young du bois. A cet effet, utilisant toujours la méthode pendulaire et l'éprouvette étant à l'intérieur d'une enceinte fermée, nous avons mesuré le module, alors que cette éprouvette était soumise à l'action de températures pouvant atteindre — 60°; ces températures étant voisines de celles que l'on rencontre dans les couches les plus froides de l'atmosphère.

a. Dispositif expérimental.

Pour refroidir l'éprouvette, nous avons fait circuler autour d'elle un courant d'air froid. Nous avons utilisé, à cet effet, une machine construite récemment par M. Ravilly, Docteur ès sciences, Professeur à l'Institut Polytechnique de l'Ouest, en vue de recherches, effectuées en liaison avec le Service technique et des Recherches scientifiques du Ministère de l'Air, sur les essais des métaux aux basses températures. Cette machine, que représente la photographie (*fig.* 74), est basée sur le principe de refroidissement de l'air par détente avec travail extérieur. De l'air comprimé à 7^{kg} arrive dans un cylindre et s'y détend en agissant sur le piston d'un petit moteur à air comprimé. Ce piston est relié, par l'intermédiaire d'un système bielle-manivelle, à un volant freiné au moyen de deux sabots. Plus le freinage est important, plus le travail du gaz est grand. La détente s'accompagne d'un fort abaissement de température.

L'air détendu passe dans un échangeur (visible à droite de la photographie) constitué par un grand nombre de tubes de cuivre; il y refroidit l'air d'entrée

qui se détend ainsi à une température de plus en plus basse. Avec ce dispositif, on atteint en 15 min une température de — 80° à — 90° pour l'air circulant entre le cylindre et l'échangeur. C'est sur cette partie du circuit que nous

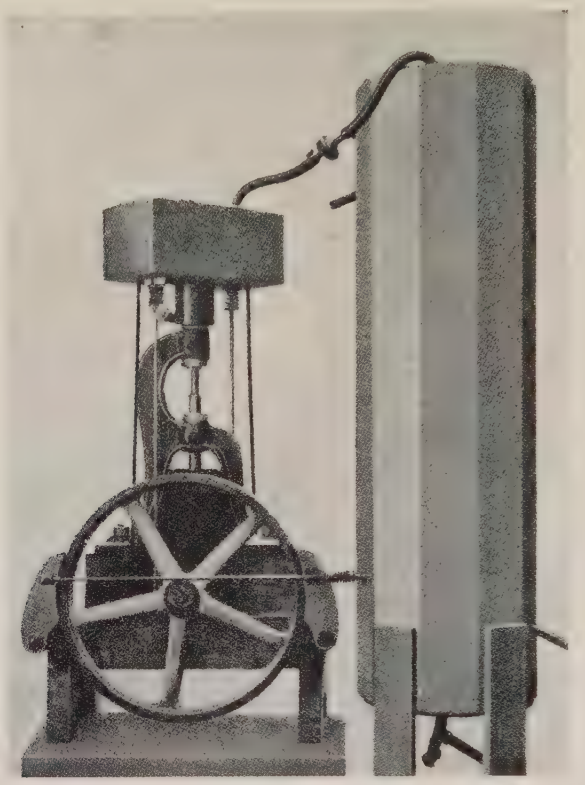


Fig. 74. Machine de détente pour la production du froid.

avons établi une dérivation, permettant d'envoyer, en quantité plus ou moins grande, l'air froid autour de l'éprouvette. Un thermomètre à pétrole, traversant le manchon dans lequel se fait la mesure, indique la température à l'intérieur.

b. **Résultats.**

Le bois étant un bon isolant de la chaleur, il faut un certain temps pour que le centre de l'éprouvette se trouve à la même température que les parties de la périphérie. Le seul moyen que nous possédions, pour nous rendre compte de l'équilibre thermique dans toute la masse de l'éprouvette, est de suivre la décroissance du module jusqu'à la stabilisation.

Par exemple, plaçant l'échantillon dans l'enceinte, où était réalisée une température de — 5°, il nous a été facile de noter un léger accroissement du module au cours des premières minutes de refroidissement; mais, de 30 à 60 min

après le début de l'expérience, aucune variation sensible nouvelle ne s'étant produite, nous avons admis que l'équilibre était établi. Pour plus de sécurité d'ailleurs, nous avons toujours maintenu l'enceinte pendant une heure à la même température avant de faire la mesure.

Étudiant les variations du module de flexion en fonction de la température, nous avons constaté que la valeur trouvée pour une température de —60° était la même que celle mesurée à des températures beaucoup moins basses, telles que —5°, et cela pour tous les bois essayés. Ainsi, l'accroissement de rigidité se produit seulement au voisinage de 0°, c'est-à-dire aux environs du point de congélation de l'eau.

Nos éprouvettes étaient taillées de façon que leur axe soit parallèle à la direction des fibres ; les variations de module ont toujours été trouvées très faibles, de l'ordre de 1/100e. Elles sont donc pratiquement négligeables.

Nous reproduisons, dans le tableau qui suit, pour un certain nombre d'éprouvettes, les valeurs du module de flexion pendulaire, trouvées, d'une part, à la température ambiante (25°) et, d'autre part, sous l'action du froid (—50°) :

ESSENCES. (Degré hygrométrique initial 14 %.)	MODULES		RAPPORT $\frac{M_2}{M_1}$.
	à 25° (M_1) (en kg/cm²).	à — 50°. (M_2) (en kg/cm²).	
Hêtre	107 800	109 200	1,012
Chêne	155 000	156 300	1,009
Peuplier	82 200	83 100	1,011
Sapin du Nord	138 100	139 600	1,010
Frêne	134 200	136 000	1,013
Spruce	128 700	131 100	1,019
Okoumé	92 800	93 400	1,007
Pin maritime	121 000	123 200	1,018
Châtaignier	85 000	85 700	1,008
Orme	93 200	95 100	1,020

Nous avons cherché si, pour des éprouvettes taillées de manière que la direction des fibres soit perpendiculaire à l'axe, la différence était du même ordre que pour celles qui sont taillées « de fil ». Nous avons donc refait les essais sur de telles éprouvettes, et obtenu les résultats suivants :

ESSENCES.	MODULES		RAPPORT $\frac{M_2}{M_1}$.
	à 25° (M_1) (en kg/cm²).	à — 50° (M_2) (en kg/cm²).	
Hêtre	16 500	19 200	1,164
Chêne	13 400	16 900	1,261
Sapin du Nord	14 300	18 000	1,208

Ainsi, nous voyons qu'en faisant les essais sur éprouvettes telles que la direction des fibres soit perpendiculaire à l'axe, le rapport entre le module de flexion à basse température et le module mesuré à la température ambiante est nettement plus grand que dans le cas d'essais sur éprouvettes « de fil ». Ce résultat paraît explicable, si l'on remarque que le bois est formé d'un ensemble de fibres liées entre elles par une matière de moindre résistance mécanique, de structure plus lâche, et contenant certainement une plus forte proportion d'eau d'inclusoin.

Dans a flexion d'éprouvettes taillées « de fil », c'est la fibre qui joue le rôle essentiel; le module n'est donc que peu affecté par la congélation de l'eau. Dans la flexion d'éprouvettes ayant leur axe perpendiculaire à la direction générale des fibres, c'est, au contraire, la matière interfibreuse qui joue le rôle principal et, par conséquent, la congélation de l'eau d'inclusion influe davantage sur le module.

Nous avons vu plus haut que la présence d'une forte teneur en eau provoque une diminution très sensible du module du bois. La congélation de cette eau doit, au contraire, le faire augmenter. La valeur du rapport $\frac{M_1}{M_2}$ doit donc varier en fonction du degré hygrométrique de l'éprouvette. Nous avons vérifié ce fait sur quelques échantillons contenant une forte proportion d'eau. C'est ainsi que pour du hêtre à 30 pour 100 d'humidité, nous avons trouvé $\frac{M_2}{M_1} = 1{,}102$ au lieu de 1,012 à 14 pour 100, et pour du chêne contenant 22 pour 100 d'eau environ 1,096 au lieu de 1,009 à 14 pour 100. Il semblerait intéressant, du point de vue théorique, d'étudier la variation du rapport $\frac{M_2}{M_1}$ en fonction de la teneur en eau. Mais on rencontrerait dans cette étude de grosses difficultés expérimentales. En effet, il est impossible d'envoyer dans l'enceinte de l'air froid qui ne soit pas sec, et cela en raison du fonctionnement même de la machine frigorifique. Par suite, avant d'obtenir la congélation de l'eau dans le bois, il se produirait une certaine vaporisation, tout au moins dans les parties ligneuses voisines de la périphérie; l'équilibre dans l'état hygroscopique de l'éprouvette se trouverait ainsi rompu, et le résultat de la mesure serait très incertain. Il faudrait faire varier l'humidité de l'échantillon par les moyens classiques, puis l'entourer d'une gaine isolante par rapport à la vapeur d'eau, pour faire l'essai aux pendules. Comme pratiquement, on ne soumet à l'action du froid que du bois sec à l'air et isolé de l'humidité, comme, d'autre part, la variation de module aux environs de 15 pour 100 d'humidité est très faible, nous n'avons pas jugé utile d'étudier l'action du froid en fonction du degré hygrométrique de l'air extérieur.

En résumé, nous conclurons seulement que la variation de module du bois soumis à l'action du froid se produit au voisinage de 0 degré. Cette variation, de l'ordre de 1 à 2/100e, pour des éprouvettes taillées de fil et séchées à l'air (humidité normale : 14 pour 100), est pratiquement négligeable. Au contraire, sur des échantillons dont la direction des fibres est perpendiculaire à l'axe ou dont la teneur en eau est plus forte, les variations des modules peuvent atteindre 3 ou 4/10e de la valeur initiale.

CONCLUSION.

Au cours de cette étude, nous avons d'abord montré comment on pouvait appliquer différentes techniques à la détermination du module d'élasticité de flexion du bois et, en particulier, la méthode des pendules couplés de M. Le Rolland.

Notre but étant, non seulement d'appliquer dans les meilleures conditions possibles, cette méthode pendulaire, mais aussi de comparer ses résultats avec ceux donnés par les autres méthodes déjà employées jusqu'ici, nous avons obtenu une série de conclusions tendant à montrer la différence importante existant pour le bois entre les résultats des essais statiques, faisant intervenir le glissement entre les fibres, et ceux des essais aux pendules opérant à charge moyenne nulle.

Le module de flexion trouvé par la méthode pendulaire devait normalement se rapprocher davantage des modules de traction et de compression que du module statique de flexion. Les modules de traction et de compression sont, en effet, mesurés de telle façon que le glissement n'intervient pas. C'est ce que nous avons vérifié avec une bonne approximation (de l'ordre de l'erreur expérimentale). Ainsi, dans les cas où l'écoulement et le glissement ne sont pas possibles, les trois modules de flexion, traction et compression sont égaux. Cette loi, comme nous l'avons dit, n'est applicable que pour d'assez faibles efforts, car, ainsi que nous l'avons vu, au delà d'une certaine contrainte à la compression, les déformations ne sont plus proportionnelles aux efforts. Il ne peut donc plus y avoir, alors, égalité des modules de traction et de compression et, *a fortiori*, de flexion.

Du point de vue pratique, nous retiendrons que le simple essai de flexion pendulaire donne une valeur exacte du module d'élasticité des pièces devant travailler à la traction simple, ou à la compression sous de faibles charges. Au contraire, toutes les fois que des pièces de bois devront travailler à la flexion sous charge constante, il sera nécessaire de tenir compte des phénomènes de glissement et de déplacement de la fibre neutre créée par l'inégalité des modules de traction et de compression. Ainsi se justifient les formules employées à l'heure actuelle et qui tiennent compte de ces deux facteurs.

Quant à l'influence de l'humidité, nous avons toujours trouvé son action prépondérante sur les propriétés mécaniques du bois. Mais notre étude n'a fait que confirmer à ce sujet, sur un plan différent il est vrai, ce que de nombreux travaux avaient déjà établi précédemment.

Enfin, nous nous sommes particulièrement occupé de la détermination du module de torsion par diverses méthodes. L'essai statique s'est révélé aussi délicat que celui de flexion sous charge constante. Les deux méthodes d'essais à charge moyenne nulle ont donné, par contre, des résultats concordants et intéressants à comparer avec ceux qui ont été trouvés pour les modules de flexion obtenus par la méthode pendulaire. Comme dans le cas de la flexion, les modules de torsion, trouvés par ces deux méthodes dynamiques, sont supé-

rieurs à ceux qui ont été obtenus sur les mêmes échantillons par la méthode statique. Mais le tableau donnant les valeurs comparatives des divers modules de flexion, de torsion et leurs rapports entre eux met nettement en évidence le degré d'hétérogénéité du bois, d'ailleurs très variable suivant les essences.

De l'ensemble de notre travail résulte que, *d'une manière générale, les méthodes dynamiques présentent une grande supériorité dans la mesure des modules du bois, qu'elles soient appliquées en flexion ou en torsion. Elles sont particulièrement aptes à atteindre les propriétés spécifiques d'élasticité du bois et leurs variations sous l'influence de divers facteurs, car elles éliminent pratiquement les effets de la plasticité qui, dans les essais statiques, masquent les véritables phénomènes élastiques.*

APPENDICE.

Application des propriétés hygroscopiques du bois.

Depuis longtemps, les propriétés hygroscopiques du bois ont été étudiées. De nombreux auteurs se sont appliqués à mesurer, par différents moyens, la teneur en eau des éprouvettes qu'ils étudiaient au point de vue mécanique. Différentes méthodes ont été employées : la plus commune consiste à peser l'éprouvette, puis à la dessécher, la différence de poids donne le taux d'humidité. On peut encore extraire, par un procédé chimique, l'eau contenue dans la matière ligneuse, ce qui donne directement la quantité d'eau qu'elle contient. On a remarqué, d'autre part, qu'à l'intérieur d'un échantillon de bois, règne une tension de vapeur fonction de l'humidité absolue de la matière; il suffit alors de percer un trou suffisamment profond (environ 10^{cm}) et d'y introduire l'extrémité d'un hygromètre à cheveux, pour faire la mesure. Un dernier procédé, plus précis que le précédent, consiste à mesurer la résistance électrique de l'échantillon, celle-ci étant intimement liée à la teneur en eau du bois ([1]).

Dans cette courte Note, nous ne nous proposons pas d'étudier la question de la valeur absolue de la teneur en eau du bois. Toutes les méthodes employées à l'heure actuelle ont déjà très largement résolu le problème. Nous nous proposons simplement d'exposer une application de la propriété d'hygroscopicité du bois en fonction de la teneur en vapeur d'eau de l'air, application que nous avons été amené à faire au cours de notre travail.

L'humidité du bois est intimement liée à celle de l'air. Ce phénomène peut devenir très intéressant si l'équilibre hygroscopique se produit assez rapidement. Pour étudier ce problème, nous avons mesuré les variations de résistance d'une éprouvette mince de bois (0,5 à 1^{mm}) d'épaisseur, au moyen d'un montage électrique appliquant la loi d'Ohm (*fig.* 75).

L'éprouvette de 70^{mm} de longueur, de 30^{mm} de largeur et de $0^{mm},5$ à 1^{mm} d'épaisseur, parcourue par le courant dans le sens des fibres, est placée en série avec le galvanomètre dans le circuit d'une batterie d'accumulateurs.

Il suffit de noter les déviations du galvanomètre et d'appliquer la loi d'Ohm pour avoir une mesure directe de la résistance. Ce montage élémentaire nous a donné d'excellents résultats, mais il a fallu réaliser l'isolement parfait de tout le circuit. L'éprouvette, visible sur la photographie (*fig.* 75), doit être placée sur un support en matière isolante, recouverte elle-même de paraffine, pour éviter une condensation créant des fuites importantes. Le galvanomètre, monté

([1]) Ces divers procédés sont décrits et étudiés en détail dans l'Ouvrage du Dr-Ing. KOLLMANN : *Technologie des Holzes* (Verlag von Julius Springer, Berlin, 1936).

sur plaque de verre, doit être suffisamment sensible (celui que nous avons utilisé, à cadre mobile, était capable de déceler des courants de l'ordre de 10^{-8} A).

Fig. 75.

Il nous a été ainsi permis de vérifier l'action immédiate de l'humidité atmosphérique sur la résistance électrique des éprouvettes de bois très plates. Pratiquement, il suffit de moins de 5 min pour que les éprouvettes soient, au

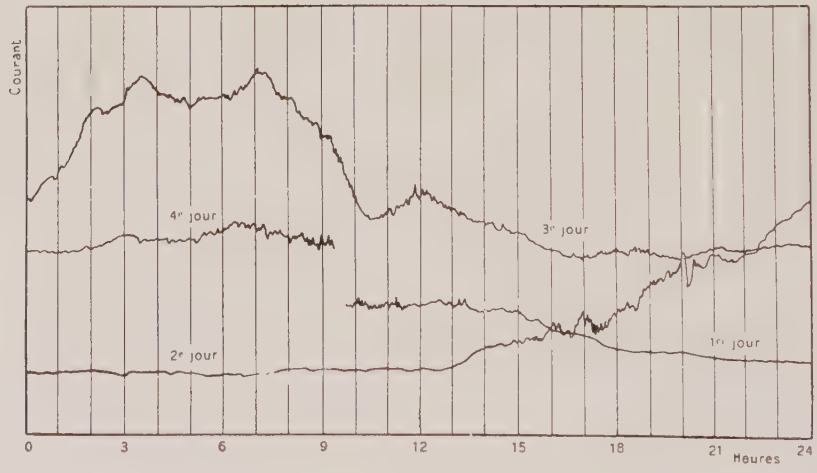


Fig. 76.

point de vue hygroscopique, en parfait équilibre avec l'air. Cette action n'intéresse pas seulement les couches superficielles. Divers essais, effectués en faisant varier l'épaisseur, nous ont montré qu'il s'agissait bien d'une conductibilité

de masse et non de surface. Nous avons remarqué, d'autre part, que le passage du courant produisait toujours un certain asséchement, limité d'ailleurs; si bien qu'après 2 ou 3 min d'exposition de l'éprouvette en atmosphère humide, temps pendant lequel est appliquée la tension électrique, il s'établit un état d'équilibre relatif, fonction de la teneur en eau de l'air ambiant. Nous avons fait de ce phénomène de nombreuses vérifications en milieu limité.

Le montage avec galvanomètre se prêtant particulièrement bien à l'enregistrement photographique, nous avons enregistré les variations d'humidité de l'air atmosphérique. La courbe, que nous donnons en réduction (*fig.* 76), représente ces variations relevées durant quatre journées consécutives. On remarquera l'extrême sensibilité du procédé. La courbe accuse, pour des espaces de temps très courts, des variations sensibles d'humidité. Elle est beaucoup plus dentelée que celle des hygromètres enregistreurs à cheveux. C'est là une preuve intéressante de la faible inertie du système car, si le bois ne changeait que lentement de résistance, il jouerait le rôle de volant et la courbe, au lieu d'être dentelée, serait simplement ondulée.

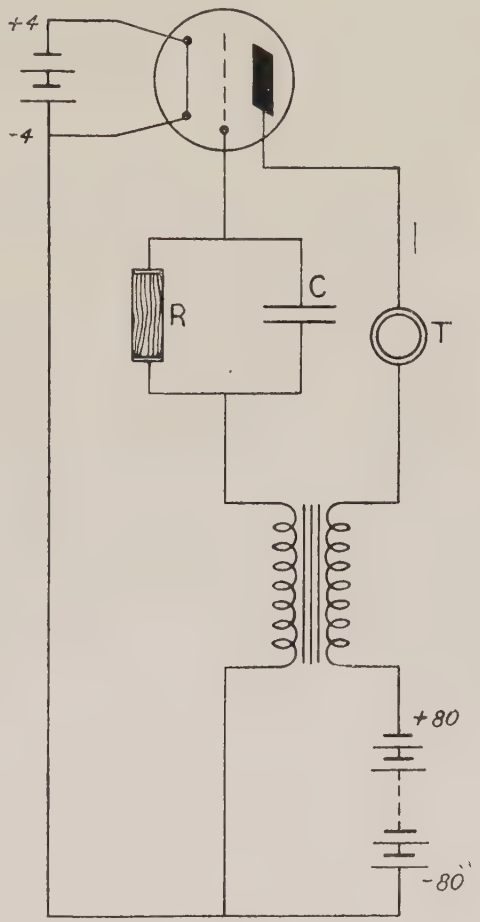


Fig. 77.

Ce dispositif d'étude possède cependant deux graves inconvénients : 1° il est peu pratique, par suite de la nécessité de réaliser un isolement parfait et d'employer un appareil aussi délicat que le galvanomètre; 2° les variations de résistance se traduisent par des variations hyperboliques de sensibilité $\left(\text{intensité } I = \frac{E}{R}\right)$, d'où grande modification de la sensibilité suivant la région où l'on se trouve.

On remédie à ces inconvénients en utilisant les oscillations de relaxation. Celles-ci sont obtenues au moyen du montage figuré ci-contre (*fig.* 77). On mesure au moyen d'un téléphone T, dans lequel se produisent des « tops », le temps que met le condensateur C à se décharger à travers la résistance variable R. Ce procédé, bien connu, donne d'excellents résultats. Il a été utilisé industriellement pour mesurer l'humidité du bois, dans un certain nombre d'hygrophones, construits par les Allemands ou les Américains. Poursuivant notre idée d'étudier les variations d'humidité de la matière ligneuse en fonction

de celle de l'air, nous n'avons utilisé ce dispositif que pour retrouver et préciser les résultats indiqués ci-dessus.

Mais nous avons alors été amené à penser qu'un hygromètre aussi sensible pouvait être utilisé pratiquement, pour mesurer la teneur en eau de matières hygroscopiques stockées. Il est, en effet, démontré que, lorsque des matières hygroscopiques se trouvent entassées depuis quelque temps, il s'établit un état d'équilibre entre l'humidité de l'air contenu dans les interstices et la teneur absolue en eau de cette matière. Il suffit donc, pour obtenir l'état hygrométrique de la substance, d'introduire à l'intérieur du tas une éprouvette témoin dont on mesure la résistance électrique. Pratiquement, cette éprouvette doit être suffisamment petite pour pouvoir être introduite facilement et elle doit être très mince pour présenter le minimum d'inertie. Par contre, elle doit être

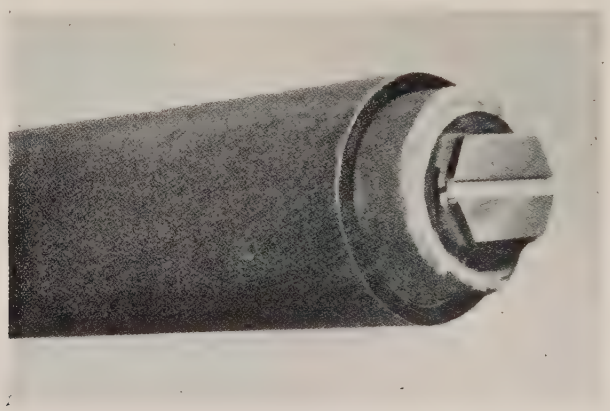


Fig. 78.

aussi large et courte que possible pour offrir un minimum de résistance au passage du courant : on diminue ainsi l'influence des pertes électriques, qui pourraient se produire malgré les précautions prises. Tenant compte de ces diverses considérations, nous avons réalisé un dispositif pratique de mesure du degré hygroscopique de matières entassées de la façon suivante (*fig.* 78).

L'éprouvette de bois a été remplacée par une feuille de papier à cigarettes de 30^{mm} de longueur, de 1^{mm} de largeur et de $3/100^{e}$ d'épaisseur. On réalise ainsi, de façon optima, les conditions indiquées. Le papier étant calibré, en coupant dans la même bande, on obtient des échantillons pratiquement semblables. C'est là un point important.

Le papier est tenu par deux mors élastiques en laiton, ou mieux, en argent (pour éviter la formation de sels), qui délimitent la longueur utile de la feuille. L'ensemble est monté sur un petit piston de 45^{mm} de diamètre pouvant glisser à l'intérieur d'un tube. Il est important de noter que ce piston doit être en matière telle qu'aucune fuite électrique ne se produise par lui. Le courant doit passer par le papier et non par la surface du support, sur laquelle seraient susceptibles de se produire des condensations. Nous l'avons réalisé en une

matière moulée, à base de gomme laque, de blanc d'Espagne, de cire et de paraffine, très isolante de l'électricité et sur laquelle nous n'avons pu constater la moindre conductibilité de surface par condensation. L'inconvénient de cette matière est qu'elle ne peut être utilisée que pour des températures relativement basses (inférieures à 50°).

Le piston se trouve introduit au sein de la masse, à l'intérieur d'une canne formée d'un tube métallique long de 2^m, terminé par une pointe facilitant l'introduction. Sur la photographie (*fig.* 78), afin de rendre visible le piston, la pointe a été enlevée. On aperçoit sur le côté du tube les petits trous, qui servent à laisser passer l'air humide, aspiré dans la masse et venant baigner l'éprouvette.

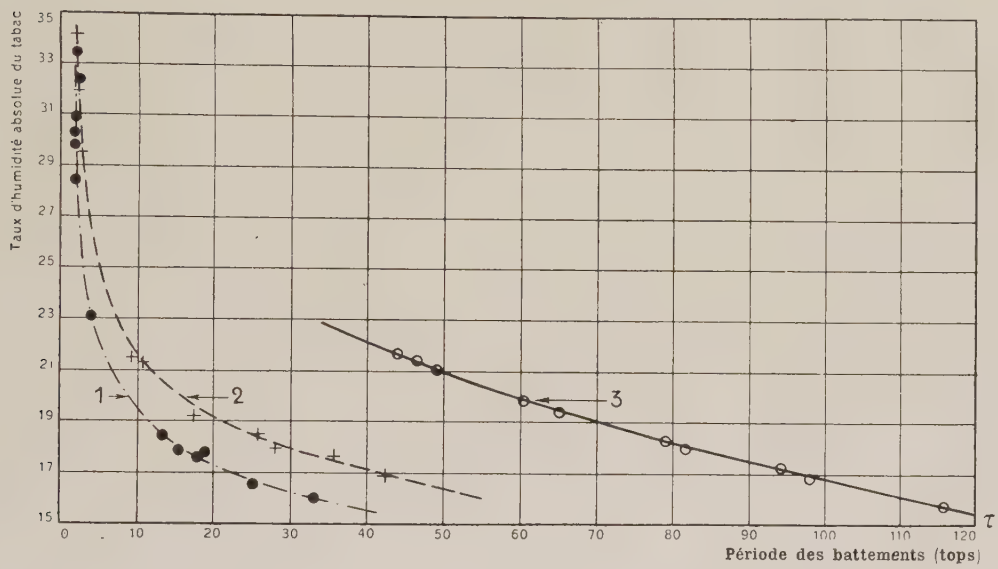


Fig. 79.

L'étalonnage de l'appareil est très facile. Il suffit de noter la période des tops, en fonction de l'humidité de la substance. Cette humidité est obtenue en mesurant la perte de poids après passage à l'étuve. A titre d'exemple, nous donnons ci-dessus (*fig.* 79) trois courbes obtenues en effectuant les mesures sur du tabac haché. La courbe (1) a été obtenue en utilisant un condensateur C de 0,2 μ et deux feuilles de papier montées en parallèle, la courbe (2) avec une capacité C = 0,5 μ et deux feuilles également montées en parallèle, enfin, la troisième avec C = 0,5 μ et une seule feuille de papier. C'est ce dernier dispositif que nous avons utilisé dans la pratique, car il offre une sensibilité plus grande et plus constante que les autres (surtout entre 15 et 20 pour 100 d'humidité, taux extrêmes des tabacs stockés).

On peut donc ainsi utiliser les variations de résistance électrique, pour mesurer directement l'état hygrométrique d'une substance entassée et suffisamment divisée.

Pratiquement, l'emploi des oscillations de relaxation présente deux inconvénients : d'abord la mesure de la durée des pulsations au téléphone demande une certaine habitude des mesures physiques; puis, elle nécessite l'emploi de deux sources de courant continu; enfin, elle peut difficilement permettre d'enregistrer d'une façon continue l'état hygrométrique de la substance.

C'est pourquoi nous avons réalisé un appareil d'emploi plus commode, donnant une lecture directe sur cadran, de la teneur en eau de la matière, en utilisant le principe du voltmètre amplificateur (*fig.* 80), qui permet de mesurer la chute de tension dans une résistance R. Nous appliquons à celle-ci,

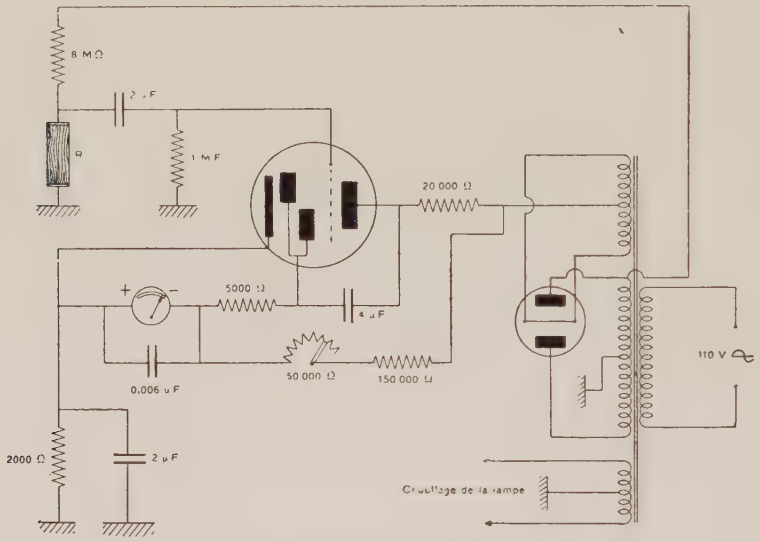


Fig. 80.

qui est constituée par l'éprouvette hygroscopique, la haute tension alternative, par l'intermédiaire d'une résistance importante, destinée à limiter la valeur du voltage utilisé. D'autre part, afin de donner à l'appareil toute sa sensibilité, nous faisons passer dans le milliampèremètre de mesure un courant d'opposition, destiné à éliminer le courant constant de plaque et à ne garder que les variations dues à celles de la chute de tension et, par conséquent, aux modifications de l'état hygrométrique. La meilleure utilisation est obtenue avec un milliampèremètre donnant toute sa graduation pour 0,2 milliampère. La résistance variable R est celle qui a été précédemment décrite. Le principe de la mesure est le même; seule, la façon dont on effectue cette mesure a changé. Il est facile d'étalonner l'appareil en vue d'une utilisation déterminée et, par exemple, de donner directement sur le cadran la valeur du taux d'humidité. D'autre part, l'enregistrement graphique de la position de l'aiguille peut permettre de suivre de façon très intéressante des variations d'humidité en fonction du temps.

Vu et approuvé :

Rennes, le 10 décembre 1942.

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

Y. MILON.

Vu et permis d'imprimer :

Rennes, le 10 décembre 1942.

Le Recteur de l'Académie de Rennes,

M. SOURIAU.

SECONDE THÈSE.

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

La Photoélasticité et ses applications.

Vu et approuvé :

Rennes, le 10 décembre 1942.

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

Y. MILON.

Vu et permis d'imprimer :

Rennes, le 10 décembre 1942.

Le Recteur de l'Académie de Rennes,

M. SOURIAU.

PARIS. — IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS
116681 Quai des Grands-Augustins, 55.

PARIS. — IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS
Quai des Grands-Augustins, 55.

116681